



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS**

**GIANCARLO BRUGNARA CHELOTTI**

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM  
SUSPENSÃO NO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO (DF), POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação de Mestrado

Área de Concentração: Geoprocessamento e Análise Ambiental

Brasília – DF

2017

**GIANCARLO BRUGNARA CHELOTTI**

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM  
SUSPENSÃO NO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO (DF), POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, cuja área de concentração é Geoprocessamento e Análise Ambiental.

**Jean Michel Martinez**

Orientador

**Co-orientador: Henrique Llacer Roig**

Coorientador

Brasília – DF

2018

**GIANCARLO BRUGNARA CHELOTTI**

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM  
SUSPENSÃO NO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO (DF), POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, cuja área de concentração é Geoprocessamento e Análise Ambiental.

Aprovado em 26/02/2018

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jean Michel Martinez (Orientador)  
IRD/FR

---

Prof. Dr. Tati Almeida (Examinadora interna)  
IGD/UNB

---

Prof. Dr. Raul Arnaldo Espinoza Villar  
UNMSM/PER

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, criador de todas as coisas, o Alfa e o Ômega, possuidor de todo saber e toda ciência a qual perseguimos teimosamente em tentar compreender.

Aos mestres (*latu sensu*), em especial Henrique Roig, Jean Michel Martinez, Gustavo Mello Baptista e Rejane Ennes, pelo compartilhamento de conhecimento, informações e tempo para que este trabalho fosse concluído em seu tempo.

Ao parceiro de campo Diogo Olivietti, que participou de praticamente todas as etapas de campo e laboratório deste trabalho, dedicando seu tempo com muito boa vontade.

Ao Colegiado, que deferiu prorrogação de prazo de defesa, garantindo que minha ascensão profissional não comprometesse a conclusão deste curso.

À minha família, em especial dona Carmita Brugnara Chelotti, que provê diversas facilidades e apoio que, de maneira indireta, contribuíram significativamente para a conclusão deste trabalho.

Ao meu filho Enzo Comin Chelotti. O simples fato de sua existência me motiva a ser melhor a cada dia, em todos os aspectos da natureza humana. És meu grande motivador e minha maior inspiração.

Por fim, agradeço especialmente à Ana Paula Sales, companheira de todas as horas, sem a qual eu sequer teria me inscrito no processo seletivo. Você passou por poucas e boas (e más) ao longo deste percurso, mas chegamos ao fim. Juntos e vitoriosos. Gratidão e amor eterno!

*"Onde você estava quando lancei os alicerces da terra? Responda-me, se é que você sabe tanto.*

*Quem marcou os limites das suas dimensões? Vai ver que você sabe! E quem estendeu sobre ela a linha de medir?*

*E as suas bases, sobre o que foram postas? E quem colocou sua pedra de esquina, enquanto as estrelas matutinas juntas cantavam e todos os anjos se regozijavam?*

*"Quem represou o mar pondo-lhe portas, quando ele irrompeu do ventre materno, quando o vesti de nuvens e em densas trevas o envolvi, quando fixei os seus limites e lhe coloquei portas e barreiras, quando eu lhe disse: Até aqui você pode vir, além deste ponto não, aqui faço parar suas ondas orgulhosas?*

*"Você já deu ordens à manhã ou mostrou à alvorada o seu lugar, para que ela apanhasse a terra pelas pontas e sacudisse dela os ímpios?*

*Quem é que abre um canal para a chuva torrencial, e um caminho para a tempestade trovejante, para fazer chover na terra em que não vive nenhum homem, no deserto onde não há ninguém, para matar a sede do deserto árido e nele fazer brotar vegetação?*

*Acaso a chuva tem pai? Quem é o pai das gotas de orvalho?*

*De que ventre materno vem o gelo? E quem dá à luz a geada que cai dos céus, quando as águas se tornam duras como pedra e a superfície do abismo se congela?*

*"Você pode amarrar as lindas Plêiades? Pode afrouxar as cordas do Órion?*

*Pode fazer surgir no tempo certo as constelações ou fazer sair a Ursa com os seus filhotes?*

*Você conhece as leis dos céus? Você pode determinar o domínio de Deus sobre a terra?*

*"Você é capaz de levantar a voz até às nuvens e cobrir-se com uma inundação?*

*É você que envia os relâmpagos, e eles lhe dizem: 'Aqui estamos'?*

*Quem foi que deu sabedoria ao coração e entendimento à mente?*

*Quem é que tem sabedoria para avaliar as nuvens? Quem é capaz de despejar os cântaros de água dos céus, quando o pó se endurece e os torrões de terra grudam uns nos outros?*

*Jó 38: 4-13; 25-38*

*Pois o Senhor é quem dá sabedoria; de sua boca procedem o conhecimento e o discernimento.*

*Provérbios 2:6*

*Pois quanto maior a sabedoria maior o sofrimento; e quanto maior o conhecimento, maior o desgosto.*

*Eclesiastes 1:18*

*a letra mata, mas o Espírito vivifica.*

*2 Coríntios 3:6*

*Ainda que eu fale as línguas dos homens e dos anjos, se não tiver amor, serei como o sino que ressoa ou como o prato que retine.*

*Ainda que eu tenha o dom de profecia e saiba todos os mistérios e todo o conhecimento, e tenha uma fé capaz de mover montanhas, mas não tiver amor, nada serei.*

*Ainda que eu dê aos pobres tudo o que possuo e entregue o meu corpo para ser queimado, mas não tiver amor, nada disso me valerá.*

*O amor é paciente, o amor é bondoso. Não inveja, não se vangloria, não se orgulha.*

*Não maltrata, não procura seus interesses, não se ira facilmente, não guarda rancor.*

*O amor não se alegra com a injustiça, mas se alegra com a verdade.*

*Tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta.*

*O amor nunca perece; mas as profecias desaparecerão, as línguas cessarão, o conhecimento passará.*

*Pois em parte conhecemos e em parte profetizamos; quando, porém, vier o que é perfeito, o que é imperfeito desaparecerá.*

*1 Coríntios 13:1-10*

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estimar a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) no reservatório do Descoberto, Distrito Federal, a partir das propriedades óticas da água e uso de imagens de satélite. Foram realizadas três campanhas em datas escolhidas em função do calendário de passagem dos sensores, da sazonalidade das chuvas e do hidrograma do reservatório. Em cada campanha foram coletadas amostras de água e realizada espectrorradiometria de campo em oito pontos distintos do reservatório, sendo seis pontos próximos a zonas de entrada de sedimentos (afluentes), um no centro e um junto à barragem. Nas amostras foi realizada a filtragem para determinação de CSS e determinação do padrão de absorção de luz. A calibração entre a CSS e o comportamento espectral dos pontos coletados gerou modelos de estimativa de CSS, o que possibilitou a investigação do comportamento temporal, sazonal e espacial desse parâmetro de qualidade da água. Os dados MODIS permitiram a geração de uma série temporal de CSS desde 2000 a 2017. O modelo proposto apresentou  $R^2 = 0,8105$  e  $RMSE\% = 46,74\%$ . Verificou-se um comportamento sazonal típico, onde as menores CSS ocorrem nos meses de seca e as maiores no período chuvoso bem como o fenômeno de retorno de sedimentos entre os meses de fevereiro e março em decorrência de veranicos no mês de fevereiro, observado em diversos anos. Dada a alta resolução temporal dos dados MODIS foi possível captar alguns fenômenos picos de CSS, associados a volumes de chuvas históricos para o DF. Os dados Landsat 8, disponíveis a partir de 2013, permitiram uma análise espacial da CSS. O modelo proposto apresentou  $R^2 = 0,8352$  e  $RMSE\% = 15,12\%$ , demonstrando que o afluente que mais contribui com carga de sedimentos é o rio Descoberto, seguido do ribeirão Rodeador. O lago possui um padrão homogêneo de CSS ao longo de quase todo ano, adquirindo heterogeneidade (variância = 25,16) apenas no início da estação chuvosa, quando está com menor volume e recebe cargas de sedimentos proporcionalmente maiores, tendendo à homogeneidade (variância = 0,92) a partir da segunda metade do período chuvoso. Os dados de reflectância dos pixels puros de água do sensor Landsat-8 tendem a superestimar as CSS em regiões mais rasas do reservatório ( $RSME\% = 37,34\%$ ). As correções atmosféricas aplicadas ao sensor Sentinel 2 tendem a superestimar os valores de reflectância dos pixels puros de água, propagando esse erro à estimativa de CSS, que é maior a medida que se desloca da região do vermelho ( $RMSE\% = 85,89$ ) para a região do infravermelho ( $RMSE\% = 112,28$ ).

**Palavras-chave:** sedimentos em suspensão; sensoriamento remoto; MODIS; Landsat 8; Sentinel 2

## ABSTRACT

This work aims estimate the suspended sediments concentration (SSC) in Descoberto reservoir, in Federal District, through the optical properties of water and satellite images. Three campaigns were performed in dates chosen according to the calendar of the sensors, the seasonality of the rains and the level of the reservoir. In each campaign, water samples were collected and field spectroradiometry was performed at eight distinct points in the reservoir, six of which were near sediment inflow sites, one in the center and one near the dam. In each samples, the filtration was carried out to determine the SSC and performed the light absorption pattern. The calibration between the SSC and the spectral behavior of the collected points generated SSC estimation models, which allowed the investigation of the temporal, seasonal and spatial behavior of this parameter of water quality. The MODIS data allowed the generation of a time series of SCC from 2000 to 2016. The proposed model presented  $R^2 = 0,8105$  and  $RMSE\% = 46,74\%$ . A typical seasonal behavior was observed, where the lowest SSC occur in the dry season and the highest in the rainy season, as well as the sediment return phenomenon among the months of February and March as a result of dryer months in February, observed in several years. Given the high temporal resolution of the MODIS data, it was possible to capture some phenomena of SSC peaks, associated with historic rainfall volumes for Federal District. The Landsat 8 data, available since 2013, allowed a spatial analysis of SCC. The proposed model presented  $R^2 = 0,8352$  and  $RMSE\% = 15,12\%$ , demonstrating that the tributary that most contributes to the sediment load is the Descoberto river, followed by the Rodeador river. The lake has a homogeneous SSC pattern throughout most of the year, obtaining heterogeneity only at the beginning of the rainy season (variance = 25,16), when it is lower and receives loads of sediment proportionally larger, tending to homogeneity from the second half of the rainy season (variance = 0,92). The reflectance data of the pure water pixels of the Landsat-8 sensor tend to overestimate the CSS in shallower regions of the reservoir ( $RSME\% = 37, 34\%$ ). The atmospheric corrections applied to the Sentinel 2 sensor tend to overestimate the reflectance values of the pure water pixels, propagating this error to the CSS estimation, which is larger as it moves from the red region ( $RMSE\% = 85.89$ ) to the infrared region ( $RMSE\% = 112.28$ ).

**Key-words:** suspended sediments; remote sensing; MODIS; Landsat 8; Sentinel 2.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Esquema simplificado do funcionamento do sensoriamento remoto. Fonte: Adaptado de <i>Spatial IT Solutions</i> .....	19
FIGURA 2	Espectros de reflectância de águas e as bandas MODIS. Fonte: Adaptado de Villar (2013).....	23
FIGURA 3	Esquema de medição de reflectância pelo método de medições direta e simultânea com três sensores medindo irradiância ( $E_d$ ), radiância do céu ( $L_d$ ) e radiância da água ( $L_w$ ), com $40^\circ < \Theta < 45^\circ$ . Fonte: Villar (2013).....	24
FIGURA 4	Processos e componentes de interação da luz com a água. Fonte: Jensen (2009).....	26
FIGURA 5	Absorção da água pura ( $a_w$ ); da matéria orgânica dissolvida ( $a_{cdom}$ ); do fitoplâncton ( $a_{ft}$ ); e dos sedimentos em suspensão ( $a_{mes}$ ). Fonte: Adaptado de Giardino et al. (2007).....	28
FIGURA 6	Retroespalhamento da água pura ( $b_{bw}$ ); do fitoplâncton ( $b_{bft}$ ); e dos sedimentos em suspensão ( $b_{bmes}$ ). Fonte: Adaptado de Giardino et al. (2007).....	28
FIGURA 7	Padrão de absorção (a), espalhamento (b) e atenuação (c) da água pura. Fonte: Dekker (1993).....	29
FIGURA 8	Padrão de absorção para diversos componentes de CDOM. Fonte: Kirk (1994).....	30
FIGURA 9	Padrão de absorção de oito tipos diferentes de fitoplâncton. Fonte: Mobley (1994).....	31
FIGURA 10	Assinaturas espectrais de diferentes rios amazônicos e suas respectivas concentrações de sedimentos. Fonte: Villar (2013).....	32
FIGURA 11	Variação da Reflectância em função de diferentes concentrações de Clorofila e CDOM. Fonte: Adaptado de Mobley (1994).....	34
FIGURA 12	Distribuição das bandas do Sentinel 2 ao longo do espectro eletromagnético. Fonte: Fletcher (2012).....	41
FIGURA 13	Fluxograma de Trabalho Proposto.....	43
FIGURA 14	Localização da Bacia do Alto Descoberto. Fonte: Reatto et al. (2003).....	44
FIGURA 15	Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto. Fonte: Adaptado de Reatto (2003).....	45



FIGURA 16	Recorte de imagem obtida pelo Sensor OLI do Satélite Landsat 8 para a região da Bacia do Alto Descoberto em agosto/2015. Composição de bandas: 4/3/2. Imagem fusionada com resolução espacial de 15m.....	46
FIGURA 17	Unidades de Conservação da Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto. Fonte de dados: IBRAM.....	47
FIGURA 18	Uso do solo da Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto em 2015. Fonte: Adaptado de Chelotti (2017).....	48
FIGURA 19	Croqui com esquema de pontos de amostragem de água no reservatório do Descoberto.....	49
FIGURA 20	Sensores espectrorradiômetros <i>Ramses</i> . O do centro mede irradiância incidente e os demais medem radiância. Fonte: <a href="http://www.trios.de/en/products/sensors/ramses.html">http://www.trios.de/en/products/sensors/ramses.html</a> .....	50
FIGURA 21	Espectrorradiômetro instalado na embarcação.....	51
FIGURA 22	Funções de ganho de bandas dos sensores MODIS e Landsat 8 na faixa do visível e NIR. Fonte de dados: NASA.....	52
FIGURA 23	Fluxograma de processamento MOD3R. Fonte: Adaptado de Menezes (2013).....	54
FIGURA 24	Máscara de análise sobre o reservatório do Descoberto para processamento no MOD3R, obtida pelo software Google Earth. Imagem de fundo obtida pelo sensor Pleiades 1B em 26/05/2016. Fonte da Imagem: TERRACAP (2016) .....	55
FIGURA 25	Comportamento sazonal da Turbidez e da Pluviometria no reservatório do Descoberto entre 2000 e 2016. Fonte de dados: CAESB e ANA.....	61
FIGURA 26	Variação temporal da Pluviometria e da Turbidez no reservatório do Descoberto, entre 2000 e 2017. Fonte de dados: CAESB e ANA.....	61
FIGURA 27	Assinaturas espectrais e suas respectivas CSS dos pontos amostrados no reservatório do Descoberto em 15/3/2016 (27a); em 9/10/2016 (27b), 28/4/2017 (24c) e média das respostas espectrais de cada dia de coleta (24d).....	64
FIGURA 28	Correlação da Rrs das bandas simuladas do vermelho (25a) e NIR (25b) dos satélites MODIS com as concentrações de sedimentos medidas em campo.....	65

FIGURA 29	Variação temporal da CSS com base em dados MODIS a partir da banda do vermelho (B1) entre 2000 e 2016.....	65
FIGURA 30	Variação temporal da CSS com base em dados MODIS a partir da banda do NIR (B2) entre 2000 e 2016.....	66
FIGURA 31	Correlação entre Turbidez NTU e CSS a partir de dados coletados em campo no reservatório do Descoberto e no Lago Paranoá.....	68
FIGURA 32	Comportamento sazonal da CSS no reservatório do Descoberto e sua associação com a pluviometria.....	70
FIGURA 33	Correlação da Rrs das bandas simuladas do vermelho (33a) e NIR (33b) do sensor Landsat - 8 com as CSS medidas em campo.....	72
FIGURA 34	Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto em 15/3/2016, com base nas bandas simuladas do vermelho (34a) e NIR (34b) do sensor Landsat-8.....	73
FIGURA 35	Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto em 9/10/2016, com base nas bandas simuladas do Vermelho (35a) e NIR (35b) do sensor Landsat-8.....	73
FIGURA 36	Correlação entre as CSS medidas em campo e as estimadas pelas equações 18 (36a) e 19 (36b) com base em imagens Landsat 8 nas mesmas datas e locais das coletas de campo.....	74
FIGURA 37	Correlação entre as bandas simuladas e reais do vermelho (37a) e NIR (37b) do Landsat 8.....	75
FIGURA 38	Correlação direta entre a CSS medida em campo e a Reflectância na B4 (vermelho) do Landsat 8 nas mesmas datas e passagem dos satélites e nos mesmos locais das coletas de campo.....	76
FIGURA 39	Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda do Vermelho do sensor Landsat-8 em 15/3/2016 (39a) e 9/10/2016 (39b).....	76
FIGURA 40	Correlação entre a CSS medida em campo e a estimada pela banda 4 do sensor Landsat 8, considerando todos os pontos (40a) e considerando os 13 pontos mais representativos (40b).....	77
FIGURA 41	Comportamento espacial as CSS entre maio de 2013 e outubro de 2016 a partir de dados Landsat 8.....	79
FIGURA 42	Correlação da Rrs dos centros das bandas 4, vermelho (38a); 5, red edge 1 (38b); 6, red edge 2 (38c); 7 red edge 3 (38d); 8, infravermelho (38e); e 8A, infravermelho (38f) do sensor Sentinel 2 com as CSS medidas em	

	campo.....	80
FIGURA 43	Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 4 (vermelho) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.....	81
FIGURA 44	Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 5 (red edge 1) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.....	82
FIGURA 45	Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 6 (red edge 2) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.....	82
FIGURA 46	Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 7 (red edge 3) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.....	83
FIGURA 47	Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 8A (NIR) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.....	83
FIGURA 48	Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 8 (NIR) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 3 correções atmosféricas diferentes.....	84
FIGURA 49	Comportamento espectral dos sedimentos em suspensão no reservatório do Descoberto em relação às bandas espectrais do vermelho ao NIR sensor Sentinel 2.....	85
FIGURA 50	Variação da Concentração de Sedimentos e Suspensão média anual e da pluviometria total anual entre 2000 e 2016 no reservatório do Descoberto. Fonte de dados: ANA (2017).....	86
FIGURA 51	Variação da Concentração de Sedimentos em Suspensão média anual e da cota do reservatório entre 2000 e 2017 no reservatório Descoberto. Fonte de dados: ANA (2017).....	87

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Especificações MODIS. Fonte: Adaptado de NASA (2002) .....	35
TABELA 2	Principais modelos de estimativa de TSS por meio de reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) com uso do sensor MODIS e suas características. Fonte: Chen et al. (2015).....	37
TABELA 3	Especificações Landsat 8. Fonte: Irons et al. (2012).....	38
TABELA 4	Valores de Pixel da banda <i>CFmask</i> do Landsat 8. Fonte: USGS (2016)....	40
TABELA 5	Especificações Sentinel 2. Fonte: Fletcher (2012).....	41
TABELA 6	Tabela 6. Principais especificações <i>Trios</i> – <i>Ramses</i> . Fonte: <a href="http://www.trios.de/en/products/sensors/ramses.html">http://www.trios.de/en/products/sensors/ramses.html</a> .....	50
TABELA 7	Concentrações de sedimentos em suspensão obtidos a partir das coletas de campo em oito pontos no reservatório do Descoberto.....	62
TABELA 8	Comparação entre CSS média medida em campo e estimada pela banda 4 do MODIS.....	68
TABELA 9	Picos de concentração de sedimentos e pluviometria associada.....	70
TABELA 10	Coefficiente de Determinação e Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual das equações de estimativas de CSS aplicadas para as bandas 4 e 5 do sensor Landsat 8.....	78
TABELA 11	Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual das equações de estimativas de CSS aplicadas para as seis bandas do sensor Sentinel 2 testadas com diferentes métodos de correção atmosféricas.....	84
TABELA 12	Evolução dos percentuais de ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto. Fonte de dados: Ferrigo (2014); Nunes e Roig (2015); e Chelotti (2017).....	87

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

6SV	<i>Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum Vectorial</i>
BHAD	Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto
CDOM	Matéria Orgânica Dissolvida
COA	Componentes Óticamente Ativos
CSS	Concentração de Sedimentos em Suspensão
ESA	<i>European Space Agency</i>
IRD	<i>Institute de recherche pour le developpement</i>
MOD3R	<i>MODIS River Reflectance Retrieval</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIR	Infravermelho próximo
POA	Propriedades Óticas Aparentes
POI	Propriedades Óticas Inerentes
R <sup>2</sup>	Coefficiente de Determinação
REM	Radiação Eletromagnética
RMSE%	Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual
SR	Sensoriamento Remoto
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
TOA	Topo da Atmosfera
TSS	Sólidos Totais em Suspensão
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
3.1	FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	19
3.1.1	RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA – REM.....	19
3.1.2	RADIÂNCIA E REFLECTÂNCIA.....	21
3.1.3	MEDIDAS DE REFLECTÂNCIA <i>IN SITU</i> .....	22
3.2	COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA.....	24
3.2.1	INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES NO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA.....	29
3.2.1.1	<i>Água pura</i> .....	29
3.2.1.2	<i>Matéria orgânica dissolvida</i> .....	30
3.2.1.3	<i>Fitoplâncton</i> .....	30
3.2.1.4	<i>Sedimentos em suspensão</i> .....	31
3.3	SENSORIAMENTO REMOTO EM ÁGUAS INTERIORES.....	32
3.3.1	USO DOS SENSORES MODIS; LANDSAT 8 E SENTINEL 2 EM AMBIENTES AQUÁTICOS.....	34
3.3.1.1	<i>O MODIS</i> .....	34
3.3.1.2	<i>O Landsat 8</i> .....	38
3.3.1.3	<i>O Sentinel 2</i> .....	40
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	44
4.2	LEVANTAMENTOS DE CAMPO.....	48
4.2.1	CALIBRAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM AS PROPRIEDADES ÓTICAS DA ÁGUA.....	51
4.3	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE.....	52
4.3.1	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS MODIS.....	53
4.3.2	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT 8.....	56
4.3.3	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS SENTINEL 2.....	57
4.4	VALIDAÇÃO.....	59

4.5	COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO COM A DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS.....	60
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	61
5.1	MENSURAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS MEDIDAS EM CAMPO.....	62
5.2	PROPRIEDADES ÓTICAS DAS ÁGUAS DO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO.....	63
5.3	ANÁLISE TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM BASE NOS DADOS MODIS.....	65
5.4	ANÁLISE ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM BASE NOS DADOS LANDSAT-8.....	71
5.5	ANÁLISE ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM BASE NOS DADOS SENTINEL 2.....	79
5.6	COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E A EVOLUÇÃO DO USO DO SOLO NA BACIA.....	86
6	<b>CONCLUSÕES.....</b>	89
7	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	91
8	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	92

## 1 INTRODUÇÃO

O homem ao longo de sua existência vem modificando o ambiente natural, muitas vezes de forma inadequada, principalmente com a expansão agrícola e urbana, acentuando o processo de degradação do ambiente, desmatamento da cobertura vegetal e desaparecimento de espécies, causando impactos negativos para o meio ambiente e interferindo em sua sobrevivência (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2014).

Uma das consequências mais comuns da ação humana é a erosão. Esse fenômeno termina com a deposição dos materiais transportados, geralmente em corpos hídricos, onde se tornam sedimentos em suspensão, causando assoreamento e alterando a qualidade da água.

As redes de monitoramento de água são normalmente baseadas na coleta de amostras em estações hidrológicas para controlar a produção, acumulação e transferência de certos elementos de interesse da bacia hidrográfica (MARTINEZ et al, 2015). Nesses casos, a eficiência do monitoramento está diretamente ligada à localização e à frequência da amostragem. Em razão disso, a determinação de parâmetros de qualidade da água é frequentemente difícil.

O Lago do Descoberto é um reservatório artificial de 12 km<sup>2</sup> criado em 1974 a partir da construção de sua barragem. Apesar do seu reduzido tamanho, esse importante manancial é responsável pelo abastecimento de mais de 60% da população do Distrito Federal. Nos últimos anos, a Estação de Tratamento de Águas do Descoberto tem registrado um aumento no grau de degradação da bacia. A qualidade da água captada aponta um crescimento do percentual de lodo e da turbidez da água, resultado da degradação ambiental da região de influência do Lago do Descoberto (DISTRITO FEDERAL, 2009).

Com a possibilidade de crise de desabastecimento de água verificada no presente momento, a necessidade de proteção e recuperação da Bacia do Descoberto se torna prioritária. Em 2016 o reservatório do descoberto chegou, pela primeira vez, a níveis inferiores a 20% de sua capacidade, forçando o governo local a aplicar sobretaxa e racionamento de água (ADASA, 2017).

A carga de sedimentos no reservatório resulta em assoreamento e redução de sua capacidade e vida útil. Além disso, afetam a qualidade da água e sua adequação para os diversos usos, bem como funciona como agente transportador de fertilizantes, pesticidas e outros compostos químicos. Uma alta concentração de sedimentos reduz a transmissão de radiação solar, interferindo na fotossíntese da vegetação aquática e do fitoplâncton, alterando



o ecossistema aquático (JENSEN, 2009). Esse cenário reflete em aumento de custo, tanto para manutenção de reservatórios, quanto para tratamento de água para consumo.

Desde a década de 1960, o Sensoriamento Remoto vem se demonstrando uma importante ferramenta para o estudo da superfície terrestre. Ao longo dos anos, o desenvolvimento tecnológico dessa área de aplicação e estudo foi intenso, fazendo surgir diversos sensores de altas resoluções espacial, espectral e temporal. Junto com a evolução dos sensores, ocorreu a evolução das ferramentas de processamento dos dados produzidos.

Estudos vêm mostrando que as imagens de satélite podem ser uma ferramenta eficiente para o monitoramento hidrológico em grandes rios e lagos, uma vez que é possível relacionar, por satélite, a cor da água ao seu conteúdo de sedimentos (MENEZES, 2013; VILLAR, 2013; GERACE et al., 2013; MARTINEZ et al., 2015). Entretanto, até o presente momento, não havia sido explorada a possibilidade de uso dessas técnicas em pequenos reservatórios voltados para o abastecimento humano.

Recentes trabalhos demonstram a possibilidade do uso de imagens do sensor MODIS para mapear a concentração de sedimentos em águas continentais (MARTINEZ et al., 2004 e MARTINEZ et al., 2009), dada sua média resolução espacial, alta resolução temporal, facilidade de uso dos dados e alta qualidade da calibração.

Com a entrada em operação do Satélite Landsat 8 e seu novo sensor imageador OLI, em 2013, as possibilidades de estudos em reservatórios se ampliaram. Esse novo sensor possui duas bandas a mais que seus antecessores, e produz imagens de 12 bits (enquanto as imagens dos demais sensores da família Landsat possuíam apenas 8 bits), aumentando significativamente a resolução radiométrica das imagens, fato que eleva o potencial de estudos hídricos por sensoriamento remoto a um novo patamar (GERACE et al., 2013), permitindo análise espacial detalhada de componentes presentes na água.

Outro recente sensor em órbita é o Sentinel 2. Esse satélite europeu possui um novo sistema imageador com alta resolução espacial, variando de 10 a 60 metros, dependendo da faixa do espectro eletromagnético, e 13 bandas espectrais, incluídas as bandas da borda do vermelho (*Red Edge*), que possuem grande potencial para estudos de qualidade da água (FLETCHER, 2012). Além disso o baixo tempo de revisita, cinco dias, também revela grande potencial para o monitoramento ambiental.

Enquanto as imagens dos satélites MODIS possuem melhor resolução temporal e pior resolução espacial, as imagens dos sensores OLI e Sentinel 2 apresentam melhor resolução

espacial e pior resolução temporal, fazendo com que esses sensores produzam dados potencialmente complementares para o estudo hidrológico.

A grande vantagem do monitoramento de corpos hídricos por imagens de satélite em relação às estações hidrológicas é que se pode monitorar toda a superfície do corpo d'água (reservatório) com alta periodicidade, a depender da resolução temporal do satélite utilizado.

A bacia hidrográfica do Alto Descoberto (BHAD) possui doze estações hidrológicas de monitoramento, sendo onze em cursos d'água afluentes do reservatório e uma no exutório desse, todas sob responsabilidade da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). O único ponto de monitoramento da qualidade da água no reservatório localiza-se no exutório da barragem (DISTRITO FEDERAL, 2009).

Apesar de haver alguns esforços no sentido de implementar um monitoramento sistemático em diversos pontos do reservatório, a CAESB não tem obtido o êxito esperado, por problemas logísticos. Dessa forma, apesar de haver diversos locais de entradas de sedimentos no reservatório, esses não são devidamente monitorados.

Felizmente, o sensoriamento remoto pode ser utilizado para monitorar as concentrações de sedimentos em suspensão, matéria orgânica dissolvida e fitoplâncton em corpos d'água, preenchendo a lacuna do monitoramento hidrológico convencional, reduzindo-se significativamente o lapso temporal das coletadas de dados, além de cobrir todo o reservatório.

## **2 OBJETIVOS**

No intuito de contribuir para o diagnóstico hídrico da Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto, o objetivo geral deste trabalho é estimar as concentrações de sedimento em suspensão (CSS) do reservatório do Descoberto, no Distrito Federal, a partir das propriedades óticas da água e do uso de imagens de satélite.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar as propriedades óticas das amostras de água por meio de espectrorradiometria de campo;
- Estimar as Concentrações de Sedimentos em Suspensão - CSS a partir dos dados MODIS; Landsat 8 e Sentinel 2.
- Analisar a dinâmica temporal do fluxo de sedimentos a partir dos dados MODIS e suas relações com o clima;
- Analisar a dinâmica espacial do fluxo de sedimentos a partir dos dados Landsat 8 e investigar a ocorrência de zonas de entrada de sedimentos;
- Testar as potencialidades do uso dos dados Sentinel 2 para a análise de sedimentos em suspensão em pequenos reservatórios;
- Correlacionar a evolução do uso do solo na Bacia com o a evolução temporal do fluxo de sedimentos no reservatório.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto (SR), como técnica de medida das propriedades da superfície terrestre, surgiu na década de 1860, baseado na utilização de fotografias aéreas (NOVO, 2008), mas foi a partir da chamada corrida espacial, ocorrida na década de 1960, quando houve o lançamento dos primeiros satélites orbitais, que ocorreram avanços científicos e tecnológicos significativos. Inicialmente, o sensoriamento foi entendido como uma nova tecnologia. Posteriormente passou a ser definido como “uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres” (MENESES, 2012).

O conceito de SR traz consigo três preceitos, segundo Meneses (2012): i) a ausência de contato entre o sensor e o objeto; ii) a informação sobre o objeto é transportada pelo espaço; e iii) essa informação é transportada por radiação eletromagnética (REM). Dessa forma, para se compreender o SR, deve-se, primeiramente entender o REM.

##### 3.1.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA – REM

A energia registrada por um sensor sofre algumas interações que precisam ser bem compreendidas para que os dados de sensoriamento remoto possam ser corretamente interpretados. Ao considerar que a principal fonte de energia do SR é o sol, essa energia: i) é radiada pela fonte; ii) viaja pelo vácuo no espaço na velocidade da luz; iii) interage com a atmosfera; iv) interage com a superfície terrestre; v) interage novamente com a atmosfera; e vi) atinge o sensor, interagindo com ele (JENSEN, 2009), conforme esquema simplificado apresentado na Figura 1.

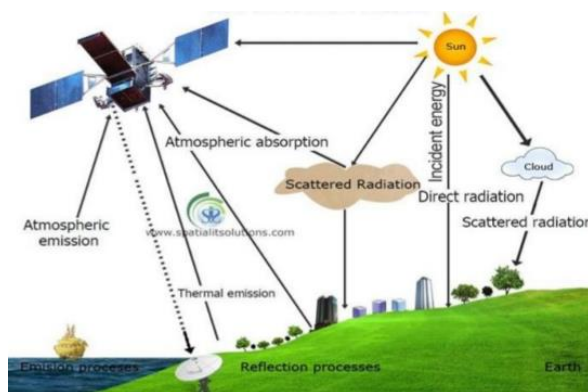


FIGURA. 1. Esquema simplificado do funcionamento do sensoriamento remoto. Adaptado de *Spatial IT Solutions*.

A REM possui uma dualidade de comportamento: onda e energia. Existem dois modelos que explicam como a REM é criada, se propaga no espaço e interage com a matéria: o modelo ondulatório e o modelo corpuscular, ou de partícula.

Segundo o modelo ondulatório, a REM pode ser explicada como uma forma de onda senoidal harmônica. A onda eletromagnética é composta de dois campos ortogonais entre si e perpendiculares à direção do deslocamento da onda: campo elétrico e campo magnético.

Neste modelo as características das imagens obtidas pelos sensores são explicadas pela relação entre o comprimento de onda e o tamanho do objeto. Essa relação é denominada interação macroscópica (MENESES, 2012). Entretanto, o modelo ondulatório falha em explicar certos fenômenos importantes quando a radiação eletromagnética interage com a matéria. Esse comportamento é mais evidente para as ondas de pequenos comprimentos.

No modelo corpuscular a REM é uma forma dinâmica de energia que se manifesta somente por suas interações com a matéria. A quantidade de energia  $E$  de um *quantum* é diretamente proporcional à frequência ( $\nu$ ) da radiação, conforme a equação 1 (MENESES, 2012):

$$E = h \cdot \nu \quad (1),$$

sendo:  $E$  a energia;  $h$  a constante de Planck; e  $\nu$  é a frequência. Ao substituir  $\nu$  a partir da equação 1 obtém-se:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} \quad (2)$$

Dessa equação verifica-se que a energia  $E$  é inversamente proporcional ao comprimento de onda da REM. Os comprimentos de ondas menores transportam, conseqüentemente, maiores quantidades de energia e possuem maior capacidade de interação com a matéria (NOVO, 2008).

De acordo com o modelo corpuscular, a energia da onda, ao atingir a superfície dos materiais, interage com ela por meio de trocas entre a energia que carrega e as energias do material. Essa interação ocorre no nível de átomos e moléculas, por isso são chamadas de interações microscópicas e, portanto são dependentes da composição química do material.

Materiais de diferentes composições, ou seja, com diferentes constituições de elementos químicos de átomos e moléculas, têm absorções e reflectâncias diferentes, resultando nas imagens em diferentes tons de cinza. Para o sensoriamento remoto, o modelo corpuscular é mais adequado para os comprimentos de ondas menores, porque esses possuem maiores energias (MENESES, 2012).

A parte da energia da radiação eletromagnética que não é absorvida é refletida para o sensor. Nesse processo, as imagens medem a radiação refletida, mas, indiretamente, podemos avaliar o que foi absorvido pelos materiais. Isso é importante, porque são essas quantidades de energia eletromagnética absorvidas pelos materiais que definem algumas informações sobre a composição dos alvos terrestres, nas imagens de sensoriamento remoto (MENESES, 2012).

### 3.1.2 RADIÂNCIA E REFLECTÂNCIA

Quando o sensor detecta e mede a radiação que deixa a superfície dos objetos, está fazendo uma medição radiométrica. Radiância é a medida da densidade de fluxo radiante que deixa um elemento de área da superfície do terreno, e que se propaga em uma direção definida por um cone elementar de um ângulo sólido contendo aquela direção (MENESES, 2012). Ou seja, o sensor mede a intensidade radiante que deixa a superfície de área do terreno limitada por um ângulo sólido  $\Omega$ .

A radiância medida por um sensor é função da irradiância, que é a quantidade de fluxo radiante que incide sobre um elemento de área da superfície de terreno (JENSEN, 2009).

Como visto anteriormente, o fluxo de energia radiante interage com a atmosfera antes de atingir a superfície terrestre. Como a cada dia, tanto o sol, quanto o sensor estão em uma posição diferente em relação à Terra e a atmosfera está em constante movimento e alteração quanto a nuvens, concentração de vapor d'água, entre outros fatores, a radiância que será medida no sensor para construir a imagem dos objetos mudará de um dia para outro, para um mesmo alvo, em função da diferente irradiância incidente sobre aquele alvo.

Essa influência da variação da irradiância pode ser eliminada, ao se medir, também, a irradiância no mesmo momento em que o sensor medir a radiância. A relação de medida da irradiância com a radiância estabelece um conceito muito importante em sensoriamento remoto, que é a reflectância.

Reflectância é a razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (*Radiância*) pela quantidade de energia incidente naquela área (*Irradiância*), medida no mesmo instante de tempo (MENESES, 2012), conforme equação 3.

$$Reflectância = \frac{Radiância}{Irradiância} \quad (3)$$

Como irradiância e radiância são densidades de fluxo, o valor dessa razão torna-se adimensional, sendo, portanto, expresso em porcentagem. Qualquer alvo no terreno poderá refletir uma porcentagem  $> 0\%$  e  $< 100\%$  da radiação nele incidente.

Os sensores imageadores não medem a irradiância solar, e por isso a imagem é uma representação digital dos valores da radiância, e não uma imagem de reflectância. Os valores de radiância são convertidos em valores digitais, gerando a imagem digital.

Segundo Menezes (2013), apesar de a radiância ser a medida mais precisa em sensoriamento remoto, há limitações em se trabalhar com esses dados quando o enfoque está na análise composicional detalhada dos alvos, diferentemente da análise de espectros de reflectância, que podem ser obtidos com espectrorradiômetros de campo.

Isso ocorre justamente pelos diversos fatores, já mencionados, que podem alterar o valor de radiância para o mesmo alvo. Os dados de reflectância permitem uma análise mais detalhada do alvo, desconsiderando-se os efeitos atmosféricos presentes nos dados de radiância.

### 3.1.3 MEDIDAS DE REFLECTÂNCIA *IN SITU*

A radiometria inclui uma série de termos e leis, muitos dos quais foram abordados no item anterior, que em sensoriamento remoto são fundamentais para explicar o significado físico dos valores da REM medidos pelo sensor (MENEZES, 2013). É por meio de medidas radiométricas que se entende com qual intensidade cada material reflete a REM nos diferentes comprimentos de onda, subsidiando o entendimento de como cada alvo pode aparecer em imagens obtidas por sensoriamento remoto (MENESES, 2001).

Os dados de reflectância *in situ* são utilizados para conhecer as características espectrais de materiais selecionados, calibrar os dados de sensores remotos e melhorar a extração de informações a partir de dados de SR (JENSEN, 2009).

Os dados coletados por sensores remotos sofrem alteração da energia refletida pelo terreno e registrada pelo sistema em função do espalhamento atmosférico, absorção e reflexão. As informações de reflectância extraídas de uma imagem podem ser corrigidas quanto aos efeitos atmosféricos, ao correlacionar com os dados de reflectância *in situ* do mesmo alvo (TEILLET et al. 2002).

Teillet (2002) define a detecção *in situ* como uma tecnologia usada para obter informação sobre um objeto quando a distância entre o objeto e o sensor é igual ou menor ao tamanho do sensor. Os dados de reflectância *in situ* de materiais quase puros na superfície terrestre são utilizados para se obter os *endmember* do material. *Endmember*, ou membro final, é a feição espectral de absorção conhecida de um alvo que é usada como referência para investigação de alvos (BAPTISTA, 2013).

Para interpretação de imagens multi e hiperespectrais é fundamental conhecer a sua assinatura espectral, ou seja, o seu comportamento espectral ao longo dos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético (MENEZES, 2013). Os sistemas sensores responsáveis por essa análise de maneira detalhada são os espectrorradiômetros.

Em geral, esses sensores coletam dados de um alvo a um metro de distância, havendo efeitos atmosféricos apenas da radiação incidente sobre o alvo. Os efeitos atmosféricos na radiação refletida são praticamente nulos. Esses equipamentos retornam a assinatura espectral dos alvos, formando um espectro praticamente contínuo. Esse espectro, por sua vez, pode ser correlacionado com as bandas de um sensor multiespectral (RUDORFF et al., 2007). A figura 2 demonstra a correlação entre espectros de reflectância das águas de dois rios, obtidas por radiometria *in situ*, correlacionadas com bandas multiespectrais do sensor MODIS.

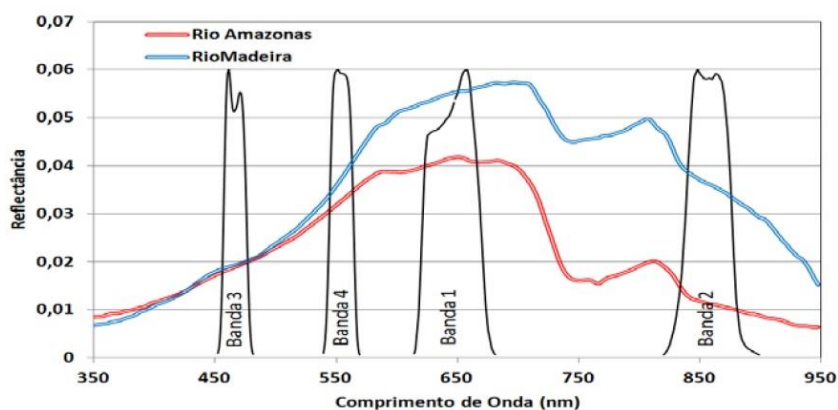


FIGURA. 2. Espectros de reflectância de águas e as bandas MODIS

Fonte: Adaptado de Villar (2013).

Assim como os sensores remotos, os espectrorradiômetros de campo utilizam a iluminação solar para obter medidas de reflectância dos alvos e, portanto, sofrem influência de atmosfera, vapor d'água, ângulo de iluminação, e reflectância da vizinhança na irradiância. Isso significa que os espectros obtidos variam em função das características atmosféricas. Levando esse fator em consideração, Jensen (2009) afirma que para utilizar dados de reflectância para calibrar espectros obtidos por SR, os dados de reflectância *in situ* devem ser coletados aproximadamente ao mesmo tempo e sob as mesmas condições atmosféricas que os da missão do sensor remoto.

As medições *in situ* podem ser realizadas dentro ou fora d'água. As medições fora d'água podem ser diretamente relacionadas com os dados de satélite e são relativamente rápidas. Entretanto a interface ar/água é um desafio às medições, pois sofre influência da reflexão especular da luz solar e da luz difusa descendente, da geometria do imageamentos, da angulação solar e da rugosidade da água.



Para se eliminar esses defeitos, pode-se utilizar o método de medições direta e simultânea. Nesse método são utilizados dois sensores de radiância e um de irradiância que realizam medições simultaneamente. A figura 3 demonstra a forma de utilização desse método que foi aplicada no presente trabalho.

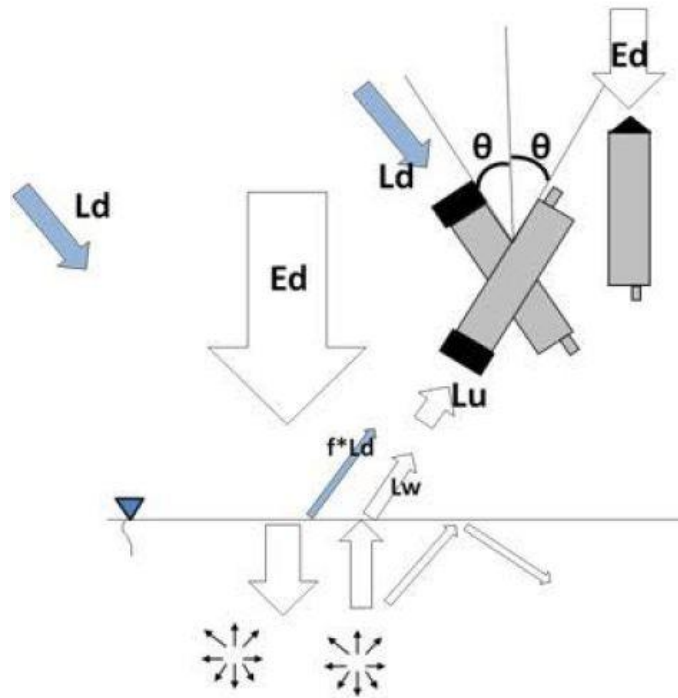


FIGURA 3: Esquema de medição de reflectância pelo método de medições direta e simultânea com três sensores medindo irradiância ( $E_d$ ), radiância do céu ( $L_d$ ) e radiância da água ( $L_u$ ), com  $40^\circ < \theta < 45^\circ$ .  
Fonte: Villar (2013).

Nessa configuração um sensor mede a irradiância solar ( $E_d$ ), outro mede a radiância difusa descendente do céu ( $L_d$ ) e outro mede a radiância emergente água ( $L_u$ ), que é o alvo de interesse. Porém o sensor  $L_u$  também registra uma fração de energia proveniente do céu, e, portanto  $L_d$ , que reflete na superfície da água em direção ao sensor. A utilização simultânea desses três sensores permite conhecer a fração de  $L_d$  que interfere na radiância da água e, posteriormente, removê-la.

### 3.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA

A água, por ser um meio fluido, sofre interações mais complexas com a REM do que alvos terrestres. Em solos, por exemplo, não há penetração da luz, fenômeno que ocorre na água. Qualquer fluxo incidente de luz atravessando uma coluna d'água pode ser transmitido, absorvido ou espalhado. De maneira simplificada a energia restante, após a interação desses fenômenos, é refletida e corresponde ao comportamento espectral.

A partir do sol, a radiação solar sofre diversas alterações até ter sua energia refletida e captada pelo sensor. Ao entrar na atmosfera, a luz sofre espalhamento e outros efeitos atmosféricos já mencionados. Ao tocar a superfície de um corpo d'água, parte da luz é refletida e outra parte penetra na água com um ângulo definido pela Lei de Snell-Descartes (KIRK,1994), conforme equação 5.

$$\sin \theta_a / \theta_w = n_a / n_w \quad (4),$$

Sendo: n o índice de refração; a o ar; e w a água.

No interior da água, parte da luz sofre espalhamento em todas as direções, fazendo com que uma fração dessa luz espalhada retorne à superfície (espalhamento para cima) por meio do fenômeno conhecido como *upward scattering*. Parte desse espalhamento pode ser entendida como uma irradiância para cima, ou seja, como se houvesse uma fonte de luz no interior da água, lançando energia de baixo para cima (do interior da coluna d'água para superfície) (KIRK, 1994). A equação 5, equação de Fresnel, explica quanto da irradiância subindo consegue voltar à atmosfera.

$$L_w = (1 - \rho)L_u(\theta) / n^2 \quad (5)$$

Sendo:  $L_w$  a radiância que sai da água;  $\rho$  o coeficiente de Fresnel;  $L_u$  a irradiância para cima; e n o índice de refração.

Dessa forma, Bukata et al. (1995) dividem a radiância total ( $L_t$ ) em quatro componentes, conforme equação 6. A Figura 4 apresenta um esquema simplificado das interações entre a luz e a água.

$$L_t = L_p + L_s + L_v + L_b \quad (6)$$

Sendo:

- $L_p$ : radiância resultante do espalhamento atmosférico que retorna ao sensor;
- $L_s$ : radiância refletida pela superfície da água;
- $L_v$ : radiância da radiação solar e atmosférica descendente que de fato penetra na água e interage com seus componentes. Conhecida como radiância volumétrica.
- $L_b$ : radiância que, após penetrar a coluna d'água, alcança o fundo do corpo d'água e é propagada de volta à superfície até alcançar o sensor.

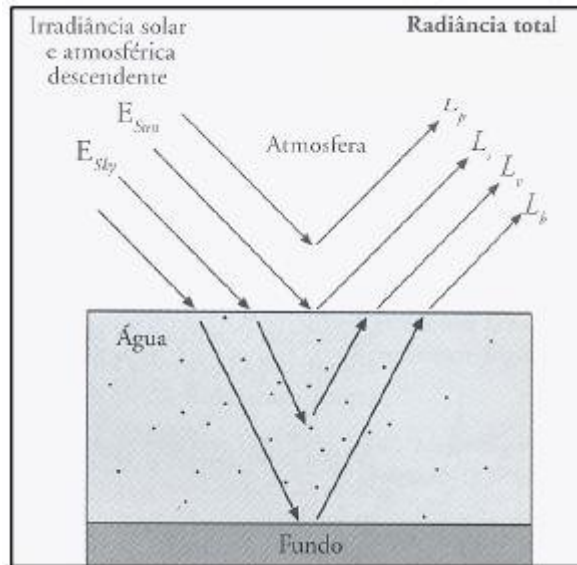


FIGURA. 4. Processos e componentes de interação da luz com a água.  
Fonte: Jensen (2009)

Dentre esses quatro componentes, o  $L_v$  é o mais indicado para se identificar os constituintes orgânicos e inorgânicos presentes na água.

A cor das águas possui forte relação com a qualidade delas. As propriedades óticas das águas podem ser divididas em dois grupos: as propriedades óticas aparentes das águas (POA), as quais variam em função da presença dos componentes na água e da geometria do sol, e as propriedades óticas inerentes das águas (POI) que variam apenas em função dos componentes na água, sendo independentes da luz e, portanto, mais estáveis que as POA, que variam o tempo todo (NOVO, 2001).

As POA sofrem influência principalmente da radiância, irradiância, reflectância e do coeficiente de atenuação vertical difuso, por isso são facilmente medidas em campo. Já as POI sofrem influência dos coeficientes de absorção, de difusão (espalhamento) e atenuação (MOBLEY, 1994; KIRK, 1994; VILLAR, 2013). A presença de componentes orgânicos e inorgânicos altera as interações entre a luz e a água por meio dos processos de absorção e espalhamento. A atenuação é correspondente à soma dos coeficientes de absorção e espalhamento, onde o fluxo radiante incidente decresce na coluna de água de maneira exponencial negativa (MOBLEY, 1994).

Os principais componentes que afetam o espalhamento (ou difusão) na água são a própria água e as partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão. A difusão altera a trajetória inicial do feixe de luz, havendo espalhamento em todas as direções, porém existem duas direções privilegiadas: espalhamento para frente, e espalhamento para trás (retroespalhamento) (VILLAR, 2013). O retroespalhamento sofre dependência de três

componentes: tamanho das partículas dissolvidas, sua concentração e índice de refração, esse último relacionado à composição do material dissolvido.

Conforme mencionado anteriormente, os dois processos básicos ao qual o fluxo radiante está sujeito em uma coluna d'água são absorção (a) e espalhamento (b) ou difusão, que são determinados por meio dos coeficientes de absorção ( $\Delta a$ ) e de espalhamento ( $\Delta b$ ), os quais são inerentes às POIs, uma vez que dependem apenas da composição do meio aquático. A soma desses coeficientes é chamada de coeficiente de atenuação ( $\Delta c$ ).

$$\Delta c = \Delta a + \Delta b, \quad (7)$$

Para as POIs, os efeitos dos diferentes componentes são aditivos, ou seja, se um corpo de água possui sedimentos, fitoplâncton e substâncias dissolvidas, os coeficientes de absorção e de espalhamento totais são a soma dos coeficientes de cada um desses componentes acrescido dos da água (KIRK,1994).

Dessa forma, pode-se afirmar que a absorção em águas é representada pela equação 8.

$$a_t = a_w + a_{cdom} + a_{ft} + a_{mes} \quad (8)$$

Sendo:

- $a_t$ : absorção total
- $a_w$ : absorção da água pura
- $a_{cdom}$ : absorção da matéria orgânica dissolvida
- $a_{ft}$ : absorção do fitoplancton
- $a_{mes}$ : absorção dos sedimentos em suspensão.

A figura 5 apresenta as absorções de cada componente dessa equação e seus respectivos comprimentos de onda.

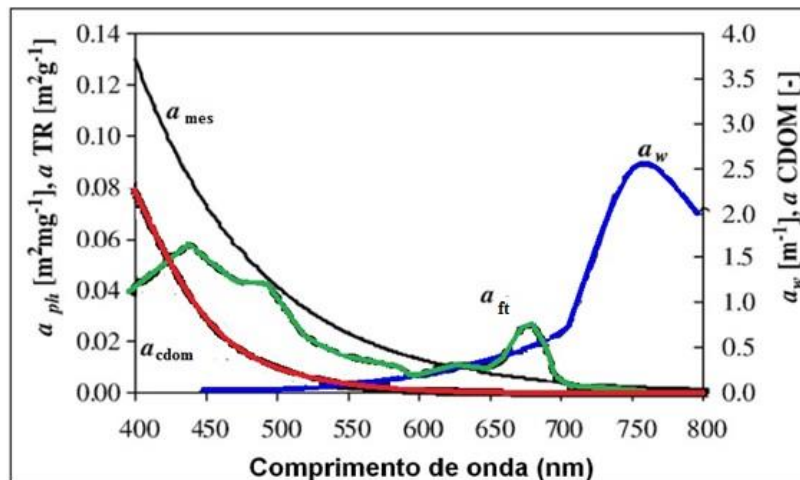


FIGURA 5. Absorção da água pura ( $a_w$ ); da matéria orgânica dissolvida ( $a_{cdom}$ ); do fitoplâncton ( $a_{ft}$ ); e dos sedimentos em suspensão ( $a_{mes}$ ).

Fonte: Adaptado de Giardino et al. (2007)

Da mesma maneira, o espalhamento é representado pela equação 9.

$$b_t = b_w + b_{cl} + b_{mes} \quad (9)$$

Sendo:

- $b_t$ : espalhamento total
- $b_w$ : espalhamento da água pura
- $b_{ft}$ : espalhamento da clorofila
- $b_{mes}$ : espalhamento dos sedimentos em suspensão

A figura 6 apresenta o retroespalhamento de cada componente dessa equação e seus respectivos comprimentos de onda.

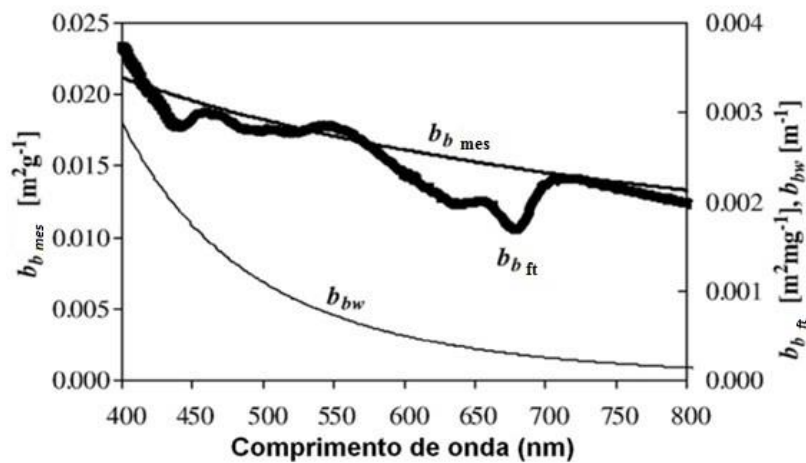


FIGURA. 6. Retroespalhamento da água pura ( $b_{bw}$ ); do fitoplâncton ( $b_{bft}$ ); e dos sedimentos em suspensão ( $b_{bmes}$ ).

Fonte: Adaptado de Giardino et al. (2007)

Com base no conhecimento dos padrões de absorção e de espalhamento dos diferentes elementos e nos espectros de reflectância obtidos por radiometria *in situ*, é possível investigar esses espectros a fim de se conhecer a concentração dos componentes opticamente ativos presentes nas águas.

### 3.2.1 INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES NO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA

Existem quatro principais componentes na água que absorvem a luz: a própria água, a matéria orgânica dissolvida, as partículas fotossintéticas e as partículas inorgânicas. Esses componentes são conhecidos como componentes opticamente ativos (COA).

#### 3.2.1.1 Água pura

A água pura absorve toda a radiação eletromagnética abaixo de 380 nm e acima de 700 nm. Nesta faixa espectral, ou seja, onde a reflectância é zero, a absorção é total. Mesmo na

faixa espectral entre 380 e 700 nm, a reflectância da água na forma líquida é relativamente pequena, ultrapassando pouco mais de 5% (MOREIRA, 2005). A figura 7 apresenta o padrão de absorção e espalhamento da água limpa, que possui absorção praticamente nula na região do azul, ocorrendo intenso crescimento na região do infravermelho do espectro eletromagnético.

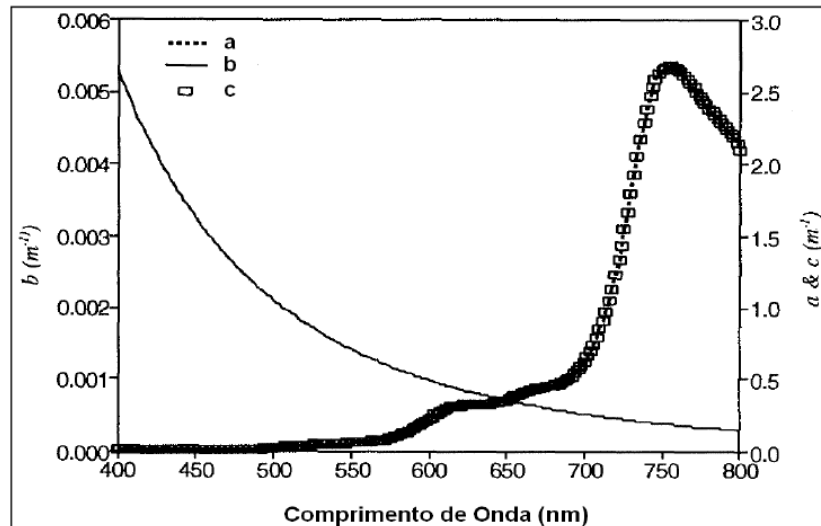


FIGURA 7. Padrão de absorção (a), espalhamento (b) e atenuação (c) da água pura. Fonte: Dekker (1993)

Pode-se afirmar que absorção e espalhamento possuem comportamento de certa forma opostos. Como os valores de absorção (a) são muito maiores que os valores de espalhamento (b), a curva de atenuação da luz (c) em água pura será muito semelhante à curva de absorção, com valores muito próximos.

### 3.2.1.2 Matéria orgânica dissolvida

A matéria orgânica dissolvida (CDOM) é proveniente de produtos intermediários de degradação da vegetação terrestre ou aquática e possui composição variável. O padrão de absorção da CDOM, obtido por meio de medição de *absorção in situ* (KIRK, 1994) demonstra que essa absorção apresenta comportamento exponencial negativa tendo a maior absorção na região do azul, decrescendo em direção ao infravermelho, conforme apresentado na figura 8.

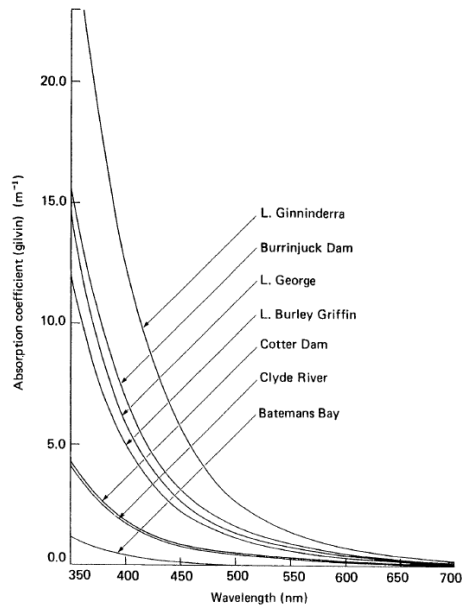


FIGURA 8. Padrão de absorção para diversos componentes de CDOM.  
Fonte: Kirk (1994)

A CDOM praticamente não gera espalhamento (DEKKER, 1993). Pode-se considerar, portanto, que a atenuação causada por CDOM é dependente apenas da absorção.

### 3.2.1.3 Fitoplâncton

O fitoplâncton corresponde ao conjunto de organismos microscópicos com capacidade fotossintética e vivem dispersos flutuando na coluna d'água. Esses organismos possuem pigmentos responsáveis pela fotossíntese que absorvem a luz. Os principais pigmentos responsáveis pela absorção da luz são clorofila-a, clorofila-b, carotenoides e fitocianinas (MOBLEY, 1994). A figura 9 apresenta o padrão de absorção da luz de diferentes fitoplanctons. Chama-se atenção aos picos de absorção nas regiões do azul (440nm) e vermelho (665nm) do espectro eletromagnético.

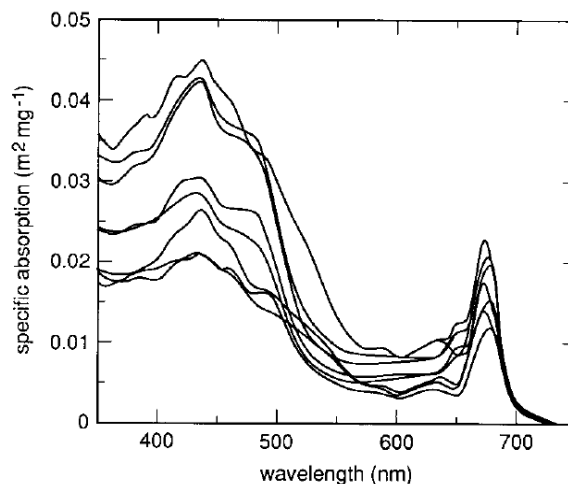


FIGURA 9. Padrão de absorção de oito tipos diferentes de fitoplâncton.  
Fonte: Mobley (1994)

### 3.2.1.4 Sedimentos em suspensão

Os sedimentos são provenientes de diversas fontes, em especial erosão e intemperismo. A maior parte desses sedimentos em suspensão está concentrada em águas interiores (BUKATA et al., 1995).

O seu padrão de absorção é modelado de maneira semelhante à CDOM. Já o padrão de espalhamento das partículas em suspensão é geralmente maior nos menores comprimentos de onda, reduzindo-se à medida que se aumenta o comprimento de onda. Sedimentos em suspensão são constituintes que ocasionam, principalmente, o efeito de espalhamento da radiação na sub-superfície de corpos d'água (RUDORFF et al., 2007). Portanto, para esse COA o empalhamento é muito mais preponderante que a absorção para obtenção da curva de atenuação, ao contrário da CDOM.

O espectro típico de reflectância da água pura aponta para uma redução da reflectância a partir dos 580nm, tendendo a zero a partir de 700nm. À medida que se incrementam sedimentos, observa-se um aumento da reflectância em todos os comprimentos de onda, ocorrendo com mais intensidade nas regiões do vermelho e infravermelho próximo (NIR). Jensen (2009) afirma que o pico de reflectância desloca-se para maiores comprimentos de onda na faixa do visível quando mais sedimentos em suspensão são adicionados. A figura 10 apresenta o os valores de reflectância para rios amazônicos em função da concentração de sedimentos em suspensão.

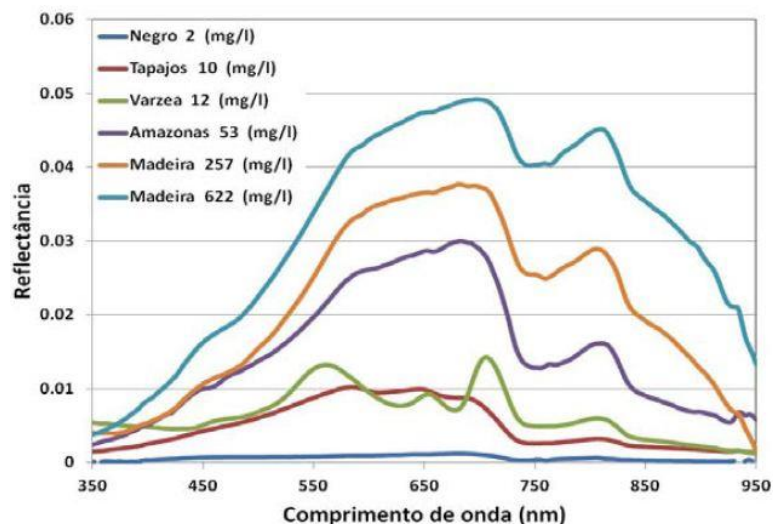


FIGURA 10. Assinaturas espectrais de diferentes rios amazônicos e suas respectivas concentrações de sedimentos.

Fonte: VILLAR, 2013



Existe forte correlação entre a concentração de sedimentos em suspensão e reflectância. Essa relação tem sido aplicada aos dados de SR para estimar a distribuição espacial de concentração de sedimentos em suspensão em águas (MARTINEZ et al., 2009 e 2015; MENEZES, 2013; PINTO et al., 2014 VILLAR et al., 2012 e 2013).

### 3.3 SENSORIAMENTO REMOTO EM ÁGUAS INTERIORES

Estudos de detecção de mudanças por meio de sensoriamento remoto são baseados no fato de que eventos, tanto naturais quanto de origem antrópica no meio ambiente, produzem variações detectáveis na resposta espectral do alvo ou do fenômeno estudado (ANDERSON et al., 2003).

À medida que o feixe de radiação eletromagnética se aprofunda na coluna de água, vai sendo alterado qualitativamente e quantitativamente, criando um campo de luz submerso cuja composição espectral e intensidade estão intimamente associados à composição da água, ou seja, às suas propriedades físicas, químicas e biológicas (MENESES, 2001). O intervalo de comprimento de onda de interesse para os estudos de propriedades óticas da água vai de 0,4 a 1,0 $\mu$ m (visível e NIR) (NOVO, 2008).

Determinadas feições que ocorrem em curvas espectrais são geralmente relacionadas à presença de COAs que favorecem a absorção e o espalhamento da radiação. Para utilizar os processos de espalhamento e de absorção da luz na água para inferir sua composição, torna-se necessário quantificá-los (MENEZES, 2013). Como as POIs são difíceis de medir, utiliza-se as POAs pela facilidade de obtenção e suficiente regularidade e estabilidade (MOBLEY, 1994).

Enquanto as POIs são geralmente obtidas em amostras de água em laboratório, as POAs são obtidas em campo pois dependem da radiação solar. Por isso essas variam em função da radiação incidente, sofrendo influência do ângulo de visada, presença de nuvens e rugosidade da superfície da água.

Para fins de quantificação das POAs, utiliza-se o coeficiente de atenuação da luz (K), a reflectância volumétrica ( $R^{-0}$ ) e a reflectância estimada a partir do sinal do sensor remoto ( $R_{sr}$ ).

O coeficiente de atenuação (K) é a taxa de perda de irradiação (E) com relação à profundidade da coluna d'água e varia em função do comprimento de onda. A reflectância volumétrica é o principal componente para relacionar as propriedades óticas das águas com a radiância medida pelo sensor. A reflectância do sinal de sensoriamento remoto é função da

reflectância volumétrica. Dessa forma é possível relacionar a reflectância volumétrica com as POIs a partir da relação proposta por Jerlov (1976):

$$R^{-0} = f \frac{b_b}{a+b_b} \quad (10)$$

Sendo:  $f$  um coeficiente que varia em função da iluminação e tipo de água;  $a$  absorção, e  $b_b$  retroespalhamento.

A  $R_{SR}$ , simulada por radiometria in situ, é dada por:

$$R_{SR} = L_w / E_d \quad (11)$$

Sendo  $L_w$  a radiância subindo (deixando a água) e  $E_d$  é o fluxo radiante total da superfície da água.

Kirk (1991) relacionou o coeficiente de atenuação descendente ( $K_d$ ) com as POAs, definindo a seguinte equação.

$$K_d = \sqrt{a^2 + Gab} \quad (12)$$

Sendo  $G$  uma função que especifica a contribuição relativa do espalhamento na atenuação vertical da luz.

Essas equações permitem relacionar as POAs que são medidas no campo com as POI que são diretamente relacionadas às propriedades biofísicas das águas (VILLAR, 2013).

Mobley (1994) apresentou a variação da  $R^{-0}$  em águas naturais em função do incremento de COAs. A figura 11 apresenta essa variação. Com o incremento da concentração de clorofila, há um deslocamento do pico de reflectância da região do azul para o verde, além de um aumento na reflectância na região do infravermelho próximo (NIR). Já o incremento de CDOM causa um deslocamento do pico de reflectância da região do azul para o amarelo. O incremento dos sedimentos já foi explicado na figura 10.

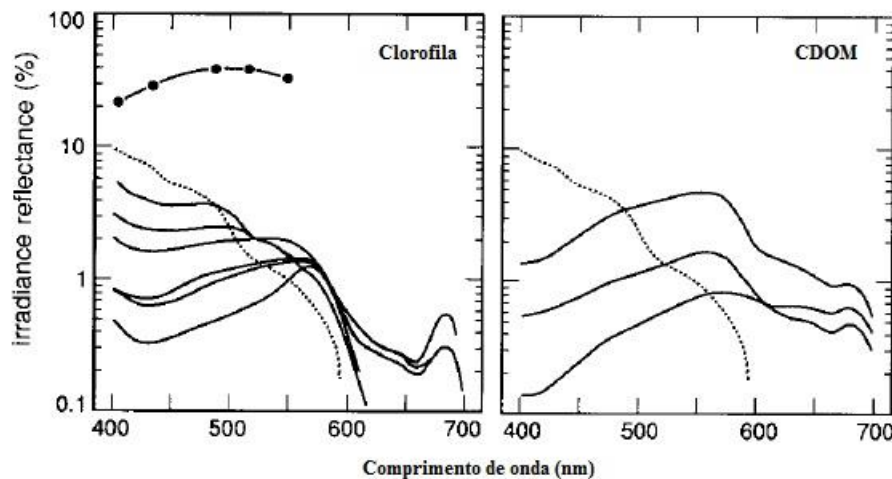


FIGURA 11. Variação da Reflectância em função de diferentes concentrações de Clorofila e CDOM. Fonte: Adaptado de MOBLEY (1994).

Muitos métodos com aproximações empíricas têm sido propostos para relacionar dados de reflectância medidos por SR com a concentração de COAs na água. Os dois métodos mais utilizados são o Método da Correlação (análise de Regressão), no qual a estimativa do parâmetro é feito por regressões estatísticas, e o Método de Modelo, no qual se utilizam espectros de reflectância padrões para diferentes variações de misturas de COAs na água, obtidos *in situ* ou em laboratório (RUDORFF et al., 2007). Geralmente os métodos requerem a obtenção de medidas *in situ* das concentrações dos COAs e a correlação dessas medidas com dados de sensoriamento remoto para se obter uma relação quantitativa (JENSEN, 2009).

Os modelos consistem em correlacionar os dados de laboratório com as propriedades óticas obtidas por radiometria *in situ* e, em seguida, correlacionar com bandas de interesse de sensores de SR.

### 3.3.1 USO DOS SENSORES MODIS; LANDSAT 8 E SENTINEL 2 EM AMBIENTES AQUÁTICOS

#### 3.3.1.1 O MODIS

Os sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) estão a bordo dos satélites TERRA e AQUA e fazem parte de um conjunto de sensores pertencentes ao projeto EOS (*Earth Observatory System*) cujos objetivos são, entre outros, observar e entender as mudanças da cobertura da terra, produtividade primária e variabilidade climática em escala global (ANDERSON et al., 2003).

Os satélites MODIS possuem ampla cobertura espacial e espectral com alta resolução temporal. Ele possui 36 bandas entre os intervalos 0,4 a 14,4  $\mu\text{m}$  do espectro eletromagnético com resolução radiométrica de 12 bits (NASA, 2002). As especificações do MODIS e suas respectivas bandas de interesse utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1: Especificações MODIS

<b>Quantização:</b>	12 bits	
<b>Resolução Espacial:</b>	250m (bandas 1-2); 500m (bandas 3-7); 1000m (bandas 8-36)	
<b>Resolução Temporal:</b>	1 dia a norte da latitude 30° e dois dias ao sul	
<b>Uso Primário</b>	<b>Banda</b>	<b>Faixa espectral (nm)</b>
<b>Terrestre</b>	1	620-670
	2	841-876
<b>Terrestre/ Propriedades das Nuvens</b>	3	459-479
	4	545-565
	5	1230-1250
	6	1628-1652
	7	2105-2155

Fonte: NASA (2002) – Adaptado.

Essas bandas estão organizadas em função de suas aplicações, possuindo diferentes resoluções espaciais e intervalos espectrais. Dada à ampla possibilidade de suas aplicações, o MODIS disponibiliza diversos produtos no intuito de facilitar a utilização desses dados. Esses produtos se dividem em dez categorias em função das três principais aplicações do sensor: balanço energético, vegetação e cobertura terrestre (ANDERSON et al., 2003).

Dentre esses produtos, destaca-se, neste trabalho, (ANDERSON et al., 2003). Quando esse produto tem origem no sensor MODIS Terra, chama-se MOD09, quando tem origem no sensor MODIS Aqua, chama-se MYD09. Esses produtos têm sido indicados para o estudo dos sistemas aquáticos ambientais (MENEZES, 2013).

De acordo com Rudorff *et al.*, (2007), a partir do processamento das imagens do produto MOD09/MYD09, podem ser obtidos dois tipos de informações sobre os sistemas aquáticos continentais: i) informação espacial sobre os corpos de água e sua alteração temporal em razão das funções de força climáticas, antrópicas e socioeconômicas; ii) informação espectral e radiométrica sobre a superfície e a composição da coluna de água (cor e brilho da água).

Com base nesses produtos, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de analisar características das águas interiores, a maior parte desses baseados em Modelo Linear de Mistura Espectral utilizando as bandas 1 e 2, vermelho e NIR, respectivamente.

Diversos estudos sobre sedimento por meio de SR estão sendo realizados em águas interiores brasileiras. Villar et al. (2012) utilizaram dados MODIS para estudar o transporte de sedimentos em suspensão ao longo do rio Madeira. Menezes (2013) estimou a concentração dos sedimentos em suspensão no reservatório de Santa Maria/MG por meio de imagens do satélite MODIS e das propriedades ópticas da água adquiridas com espectrorradiometria de campo. Villar (2013) analisou fluxos sedimentares na Bacia Amazônica a partir de dados MODIS. Pinto et al. (2014) monitoraram o fluxo de entrada de sedimentos no braço do Rio Indaiá no reservatório de Três Marias, MG, com base em dados MODIS. Santini et al., (2014) estimaram a erosão e concentração de sedimentos na bacia do rio Ucayali/Peru com base em dados MODIS.

Chen et al. (2015) levantaram os principais trabalhos de estimativa de sólidos totais em suspensão (TSS) por meio do sensor MODIS. A Tabela 2 apresenta esses trabalhos e suas

respectivas resoluções espaciais, bandas utilizadas, modelo, coeficiente de determinação e abrangência de estimação de TSS.

Tabela 2. Principais modelos de estimativa de TSS por meio de reflectância de sensoriamento remoto (Rsr) com uso do sensor MODIS e suas características.

Author(s) and resolution	Bands(nm)	Model	R <sup>2</sup>	n	TSS range	Location
Jiang and Liu (2011) (MODIS 1000-m)	Rrs(470), Rrs(555)	$TSS = 1365.5(Rrs(470) + Rrs(555))^2 - 369.08(Rrs(470) + Rrs(555)) + 27.216$	0.81	27	0-40	Poyang Lake, China
Zhang et al. (2010a,b) MODIS 1000-m	Rrs(488), Rrs(555), Rrs(645)	$\log_{10}TSS = 0.6311 + 22.2158(Rrs(555) + Rrs(645)) - 0.5239(Rrs(488)/Rrs(555))$	0.87	81	0.68-27.2	Yellow and East China Seas
Wang et al. (2010b) MODIS1000-m	Rrs(859), Rrs(1240)	$\ln(TSS) = 0.262(Rrs(859) - Rrs(1240)) + 4.117$	0.78	35	74-881	Lower Yangtze River, China
Villar et al., 2013 MODIS 250-m	Rrs(645), Rrs(859)	$TSS = 1020 * Ratio^{2.94}$ $Ratio = Rrs(859)/Rrs(645)$	0.62	282	25-622	Maderia Rviver, Brazil
Ondrusek et al. (2012) MODIS 250-m	Lw(645)	$TSS = 3.8813Lw(645)^3 - 13.822Lw(645)^2 + 19.61Lw(645)$	0.79	35	4.5-14.9	Chesapeake Bay, United States
Chen et al. (2011a) MODIS 250-m	Rrs(645), Rrs(859), Rrs(645)	$TSS = 78.764Rrs(645)^3 - 6.279$ $\log_{10}(Rrs(859))/\log_{10}(Rrs(645)) = -0.1325$	0.81	18	0-210	Apalachicola Bay, United States
Chen et al. (2011b) MODIS 250-m	Rrs(859), Rrs(645)	$\log_{10}(TSS)^2 + 0.7429\log_{10}(TSS) + 0.6768$ $\log_{10}(Rrs(859))/\log_{10}(Rrs(645)) = 0.4339$	0.8	25	1.29-208	Apalachicola Bay, United States
Zhao et al. (2011) MODIS 250-m	Rrs(645)	$TSS = 2.12 \exp(45.92Rrs(645))$	0.78	63	0-87.8	Mobile Bay estuary, Alabama
Tarrant et al. (2010) MODIS 250-m	Rrs(859), Rrs(645)	$TSS = 0.0213(Rrs(645) - Rrs(859)) + 0.232$	0.82	105	0.30-13.4	Roosevelt, Bartlett Pleasant Lake, United States
Wang et al. (2010b) MODIS 1000-m	Rrs(859), Rrs(1240)	$\ln(TSS) = 0.262(Rrs(859) - Rrs(1240)) + 4.117$	0.78	35	74-881	Lower Yangtze River, China
Wang et al. (2010) MODIS 250-m	Rrs(859), Rrs(645)	$\log_{10}(TSS) = 1.5144 \log_{10}(Rrs(859)) - 0.5755$ $\log_{10}(TSS) = 0.1497 \exp(1.5859 \log_{10}(Rrs(859)) / \log_{10}(Rrs(645)))$	0.72	16	1-64	Apalachicola Bay, United States
Chen et al. (2009a,b) MODIS 250-m	Rrs(859), Rrs(645)	$\log_{10}(Rrs(859)) / \log_{10}(Rrs(645)) = -0.1356$ $\log_{10}(TSS)^2 + 0.7402\log_{10}(TSS) + 0.6836$	0.85	25	1.29-208	Apalachicola Bay, United States
Jiang et al. (2009) MODIS 250-m	Rrs(859)	$\log_{10}(TSS) = 0.3568 \ln(Rrs(859)) + 3.3431$	0.81	56	0-170	Taihu Lake, China
Wu and Cui (2008) MODIS 250-m	Rrs(645)	$TSS = 86.2362Rrs(645)^3 - 15.858.70Rrs(645)^2 + 1005.29Rrs(645) - 15.67$	0.92	42	0-142	Poyang Lake, China
Liu and Rossiter (2008) MODIS 250-m	Rrs(645)	$TSS = 7167Rrs(645) - 42$	0.91	25	15.6-518.8	Poyang Lake, China
Kutser et al. (2007) MODIS 250-m	Rrs(645)	$TSS = 349.83Rrs(645) + 2.9663$	0.86	11	2-8	Muga and Sillamäe Port, Estonia
Liu et al. (2006) MODIS 250-m	Rrs(645), Rrs(859)	$\ln(TSS) = 2.495(Rrs(645) - Rrs(859)) / (Rrs(645) + Rrs(859)) + 1.810$	0.72	41	23.4-61.2	Middle Yangtze River, China
Sipelgas et al. (2006)	Rrs(645)	$TSS = 110.3Rrs(645) + 2$	0.58	48	3-10	Pakri Bay, Finland
Hu et al. (2004) MODIS 250-m	Rrs(645), Rrs(859)	$TSS = 0.00522 \exp(1002(Rrs(645) - Rrs(859)))$	0.9	31	2-11	Tampa Bay, United States
Miller and McKee (2004) MODIS 250-m	Rrs(645)	$TSS = -1.91 + 1140.25Rrs(645)$	0.89	52	0-60	Lake Pontchartrain, Mississippi

Fonte: CHEN et al., (2015).

A maior parte desses trabalhos utilizou o MODIS Reflectance Retrieval over Rivers (MOD3R), um programa de pós-processamento de imagens MODIS desenvolvido pelo *Institute de recherche pour le developpement - IRD*, da França, em linguagem JAVA para a extração de séries temporais de reflectância de imagens MODIS dos corpos hídricos. É uma funcionalidade desenvolvida para ser facilmente para medidas de concentração de sedimentos ou de fitoplâncton em corpos hídricos (ANA, não publicado).

O algoritmo desenvolvido para o programa determina com precisão e com consistência ao longo do tempo os pixels de água pura em uma imagem, ou seus melhores candidatos, independentemente dos tipos de morfologia dos rios. A partir dos valores de reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho das imagens MODIS, é possível determinar as concentrações de superfície de sedimentos e fitoplâncton da água (ANA, não publicado).

A grande vantagem desse programa é que ele permite processar automaticamente um grande número de imagens apenas informando a área de interesse na imagem através da seleção de uma máscara. Dessa forma é possível construir uma grande série temporal de uma área de interesse (trecho de rio ou reservatório).

Até o presente momento os dados MODIS e o Software MOD3R têm sido utilizados para o monitoramento de grandes rios e lagos (VILLAR et al., 2012; PINTO et al., 2014; MARTINEZ et al., 2015). O desafio deste trabalho é a utilização desses insumos em pequenos reservatórios.

Apesar ampla utilização do sensor MODIS no estudo de qualidade de águas interiores há uma lacuna que ele não consegue preencher adequadamente: a resolução espacial. Essa lacuna pode ser preenchida pelos satélites Landsat 8 e Sentinel 2.

### 3.3.1.2 O Landsat 8

O Landsat foi o primeiro satélite a ser lançado, em 1972, com o objetivo de se estudar a superfície da Terra. Gerenciado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e pelo *United States Geological Survey* (USGS), ele está na oitava missão (Landsat 8) lançada em 2013.

Até sua sétima geração (Landsat 7), apesar da boa resolução espacial, suas características radiométricas, a pouca quantidade de bandas no visível e infravermelho próximo (VNIR) e baixa resolução radiométrica (8 bits), demonstraram apenas um limitado sucesso na estimativa de COAs em águas interiores. Com a evolução para resolução de 12 bits, acrescida de mais uma banda no visível e um novo sistema de imageamentos, o OLI demonstra-se radiometricamente superior para a análise de águas interiores. (GERACE et al., 2013). A tabela 3 apresenta as principais características do sensor OLI, a bordo do Landsat 8.

Tabela 3. Especificações Landsat 8

<b>Quantização:</b>	12 bits	
<b>Resolução Temporal:</b>	16 dias	
<b>Banda</b>	<b>Faixa Espectral (nm)</b>	<b>Resolução Espacial (m)</b>
1	430 – 450	30
2	450 – 510	30
3	530 – 590	30
4	640 – 670	30
5	850 – 880	30
6	1570 – 1650	30
7	2110 – 2290	30
8	580 – 680	15
9	1360 - 1380	30
10	10600 – 11190	100
11	11500 - 12510	100

Fonte: IRONS et al. (2012)

Além dessas melhorias, o USGS passou a distribuir diversos produtos aprimorados a partir dos dados do OLI. Destacam-se entre esses produtos a imagem de reflectância de superfície e o produto *CFmask*.

A imagem de reflectância de superfície do OLI é obtida pelo processo de correção atmosférica baseado em um rigoroso modelo de transferência radiativa, conhecido como *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum Vectorial - 6SV* (VERMOTE et al., 2006), que utiliza uma descrição das propriedades atmosféricas a partir de dados auxiliares para a parte menos crítica dos constituintes atmosféricos (por exemplo, dispersão de Rayleigh, absorção gasosa) e a resposta da concentração de aerossol, utilizando as bandas centradas nos comprimentos de onda mais curtos (Azul), onde a reflectância da superfície é geralmente pequena e a resposta do aerossol é intensa (VERMOTE et al., 2016).

Esse método de correção atmosférica é o mesmo aplicado para gerar os produtos de reflectância de superfície do MODIS (MOD09 e MYD09) e foi refinado para o Landsat 8 para aproveitar as novas bandas do sensor, em especial a Azul costal (0,433 a 0,45  $\mu\text{m}$ ), que é particularmente útil para recuperar as propriedades do aerossol, e a banca Cirrus (1,36 – 1,39  $\mu\text{m}$ ), que facilitam a detecção de nuvens e sombra de nuvens (VERMOTE et al., 2016).

A aplicação ao Landsat 8 demonstrou um desempenho comparável ao algoritmo do MODIS para a recuperação de aerossol em terra, bem como para o produto de reflectância de superfície (CLAVEIRE et al, 2015).

O *CFmask* é uma banda originalmente desenvolvida a partir da imagem de reflectância de superfície para automatizar a identificação de nuvens, sombras de nuvens e neve para imagens Landsat TM e ETM+. Essa banda identifica pixels de nuvens, sombras de nuvens, neve ou água no produto de reflectância de superfície do OLI (USGS, 2016). Para cada um desses elementos é atribuído um valor de pixel, conforme tabela 4.

Tabela 4. Valores de Pixel da banda *CFmask* do Landsat 8.

Valor do Pixel	Interpretação
255	Cheio
0	Limpo
1	Água
2	Sombra de nuvem
3	Neve
3	Nuvem

Fonte: USGS (2016)

Gerace et al., (2013) compararam as potencialidades do sensor OLI com s sensores AVIRIS, MERIS e ETM+ para monitoramento da qualidade da água. Os resultaram demonstraram significativa evolução na acurácia e redução de erro percentual do OLI em

relação ao seu antecessor ETM+ e relativa equivalência entre as estimativas em comparação com AVIRIS e MERIS, indicando alta potencialidade desse sensor em estudos hidrológicos.

Manzo et al., (2015) analisaram a sensibilidade de um modelo bio-ótico por meio de dados Landsat 8 e Sentinel 2 e 3 para estimação de concentrações de clorofila, sedimentos em suspensão e CDOM. Watanabe et al., (2015) testaram modelos de estimativa de concentração de clorofila com uso de dados de reflectância do Landsat 8. Em ambos os casos, foi demonstrada uma correlação adequada e boa acurácia na estimação de COAs. Dada a relativa novidade dos dados Landsat 8, não foram exploradas, ainda, análises de dinâmica espacial de COAs ao longo do tempo; a identificação de zonas de entradas de sedimentos, bem como na utilização sistemática desses dados para monitoramento hidrológico.

### 3.3.1.3 O Sentinel 2

Os Sentinel 2 são satélites que compõem o Programa Global de Monitoramento para o Meio Ambiente e Segurança (GMES) da *European Space Agency* (ESA). Lançado em 23/6/2015, o satélite Sentinel 2A é um imageador multiespectral desenvolvido para o mapeamento da cobertura da terra e detecção de mudanças, avaliação de variáveis biofísicas, clorofila e índices foliares, bem como para apoiar esforços de socorro (DRUSCH, et al., 2012). Os satélites Sentinel 2 vieram para substituir a família SPOT e realizar a cobertura sistemática global entre os as latitudes 56° S e 84° N com período de revisita de cinco dias no equador e alta resolução espacial, conforme especificações apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Especificações Sentinel 2

<b>Quantização:</b>	12 bits	
<b>Resolução Temporal:</b>	5 dias	
<b>Banda</b>	<b>Centro de banda (nm)</b>	<b>Resolução Espacial (m)</b>
1	443	60
2	490	10
3	560	10
4	665	10
5	705	20
6	740	20
7	783	20
8	842	10
8a	865	20
9	945	60
10	1380	60
11	1610	20
12	2190	20

Fonte: Fletcher, 2012.



A grande novidade desse satélite são as bandas 5, 6 e 7, conhecidas como bandas da borda do vermelho (*Red Edge*) com grande potencial para estudos relacionados à vegetação (FLETCHER, 2012). Essas finas bandas localizadas entre as regiões do vermelho e NIR também possuem grande potencial de utilização para a estimativa de COAs em águas, conforme demonstrado no presente trabalho. A figura 12 apresenta a distribuição das bandas do Sentinel 2 ao longo do espectro eletromagnético.

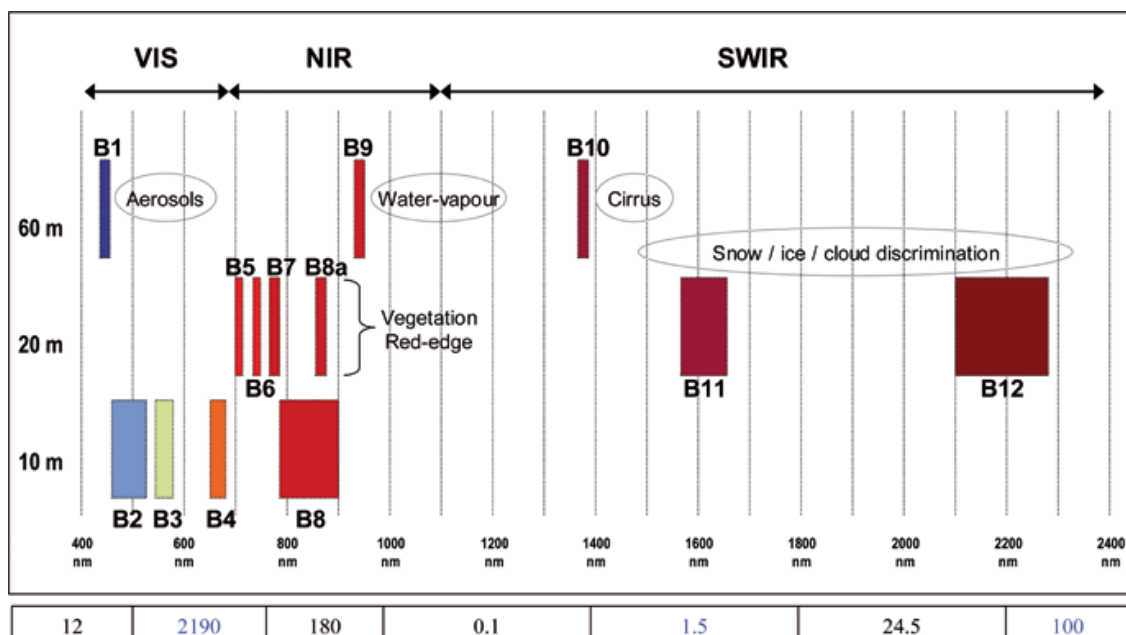


FIGURA 12. Distribuição das bandas do Sentinel 2 ao longo do espectro eletromagnético.

Fonte: Fletcher (2012)

Dado o seu recente lançamento, ainda existem poucos estudos publicados sobre o uso desse sensor. Especialmente quanto à estimativa de COAs, Tomming et al. (2016) realizaram estudos preliminares para estimativa de concentrações de clorofila a; carbono dissolvido e matéria orgânica dissolvida a partir de dados Sentinel 2 em lagos na Estônia e concluíram que o Sentinel 2 possui grande potencial para o mapeamento de concentrações desses parâmetros em águas interiores. Além disso, não observaram diferença significativa entre as estimativas a partir de dados de reflectância no topo da atmosfera (TOA) e a partir de dados de reflectância de superfície. Já Martins et al. (2017), ao testarem métodos de correção atmosféricas em imagens Sentinel 2 aplicadas a planícies alagadas na Amazônia, chegaram à mesma conclusão quanto ao potencial do Sentinel 2 para estudos em águas interiores, mas concluíram que o uso de imagens de reflectância TOA para estudos hidrológicos é muito difícil dada a alta contribuição da atmosfera na resposta espectral.

Vanhellemont e Ruddick (2016), por sua vez, avaliaram a potencialidade de aplicação do Sentinel 2 para o sensoriamento remoto da água por meio da comparação desse sensor com o OLI em um estudo de caso concentração de cianobactérias em lago na Austrália utilizando o

mesmo algoritmo de correção atmosférica para ambos sensores e concluíram as imagens OLI possuem melhor desempenho sinal-ruído e melhor detecção de nuvens. Entretanto, entendem que os dados dos dois sensores podem ser utilizados de forma complementar tanto do ponto de vista temporal, quanto espectral, e que o uso de dados auxiliares do OLI podem melhorar a correção atmosférica do Sentinel 2.

A correção atmosférica do Sentinel 2 parece ser uma questão desafiadora para os estudos de qualidade da água, pois as imprecisões das reflectâncias de superfície propagam erros nas estimativas de parâmetros de qualidade da água (MARTINZ, et al., 2017). Essas conclusões ainda preliminares sobre a utilização dos dados Sentinel 2 revelam a necessidade de estudos mais aprofundados para determinação do dado mais apropriado para estimação de COAs em águas interiores.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada no presente trabalho seguiu o fluxograma proposto na figura 13. Simplificadamente, foram realizadas três campanhas de campo, sendo duas realizadas nos mesmo dia de passagem do satélite Landsat 8 e uma realizada no mesmo dia de passagem do Sentinel 2. Em cada campanha foram coletadas amostras de água e realizada medição da reflectância *in situ* por meio de espectrorradiometria de campo. As amostras coletadas foram filtradas para determinação de concentração de sedimentos, bem como submetidas à análise por um medidor de absorção. As concentrações medidas foram correlacionadas com os dados de reflectância *in situ* para calibração. Posteriormente esses dados foram correlacionados com os dados de reflectância de sensoriamento remoto para estimativa das concentrações por meio de sensoriamento remoto. As concentrações estimadas foram comparadas com as concentrações medidas para validação dos modelos. A coleção de imagens MODIS permitiu a análise da série temporal de CSS, enquanto as imagens Landsat 8 e Sentinel 2 permitiriam a análise da distribuição espacial desse parâmetro. Por fim, os dados de concentração estimados por sensoriamento remoto foram comparados com a evolução do uso e ocupação do solo da bacia, no intuito de verificar algum relacionamento entre esse parâmetro de qualidade da água e o uso do solo na bacia.

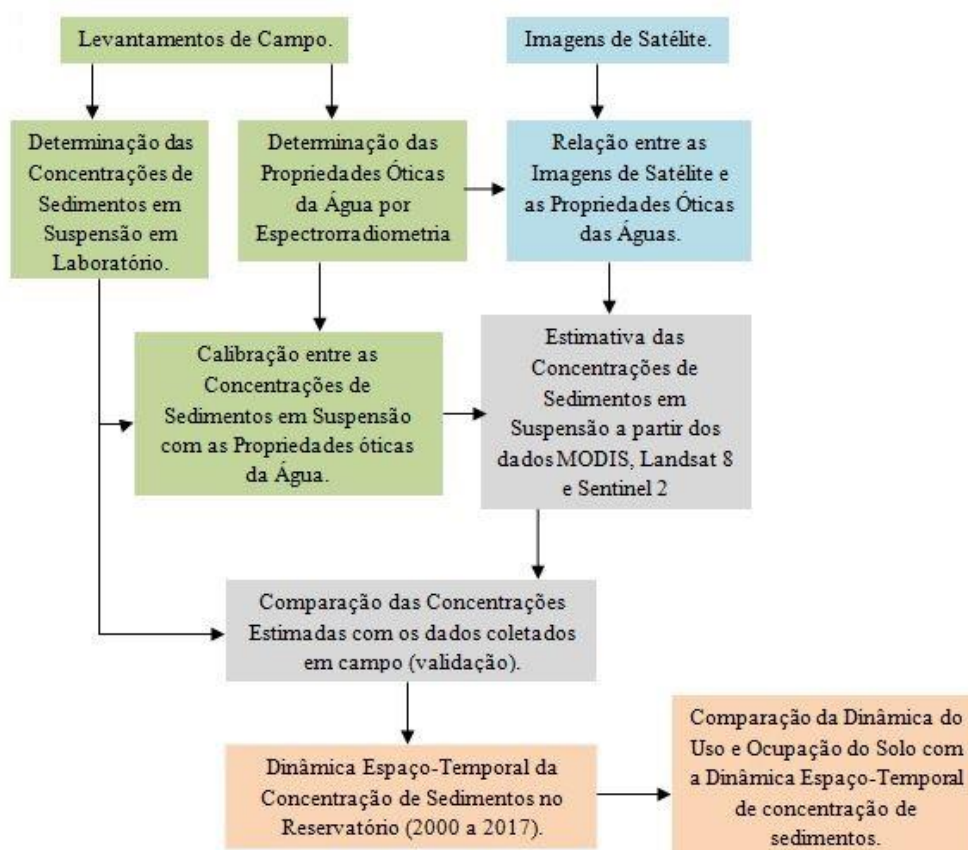


FIGURA 13. Fluxograma de Trabalho Proposto

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO:

O reservatório do Descoberto é um lago artificial, criado em 1974, e possui 1,255 ha de espelho d'água e volume de 85,99 h<sup>3</sup><sup>1</sup>, sendo 72,29h<sup>3</sup> de volume útil (ADASA, 2016). Nesse reservatório encontra-se a captação de água mais importante do Distrito Federal – DF, com capacidade nominal de 4.800 L/s e vazão média captada de 2.855 L/s, responsável por 67,22% do abastecimento dessa unidade da Federação (GUIMARÃES et al., 2013). A área de drenagem do reservatório do Descoberto, conhecida como Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto – BHAD, corresponde à porção norte da bacia hidrográfica do rio Descoberto, sendo considerado como seu exutório a Barragem do Descoberto.

A BHAD está localizada na região Centro Oeste, inserida parte no Distrito Federal e outra no Estado de Goiás, tendo em seu interior a cidade satélite de Brazlândia (DF) e parte das cidades de Taguatinga e Ceilândia (DF) e Águas Lindas (GO). Situa-se entre as latitudes 15°35'00'' e 15°48'00'' S e as longitudes 48°03'00'' e 48°15'00'' O, abrangendo uma área de 452 km<sup>2</sup>, conforme mapa de situação apresentado na figura 14.

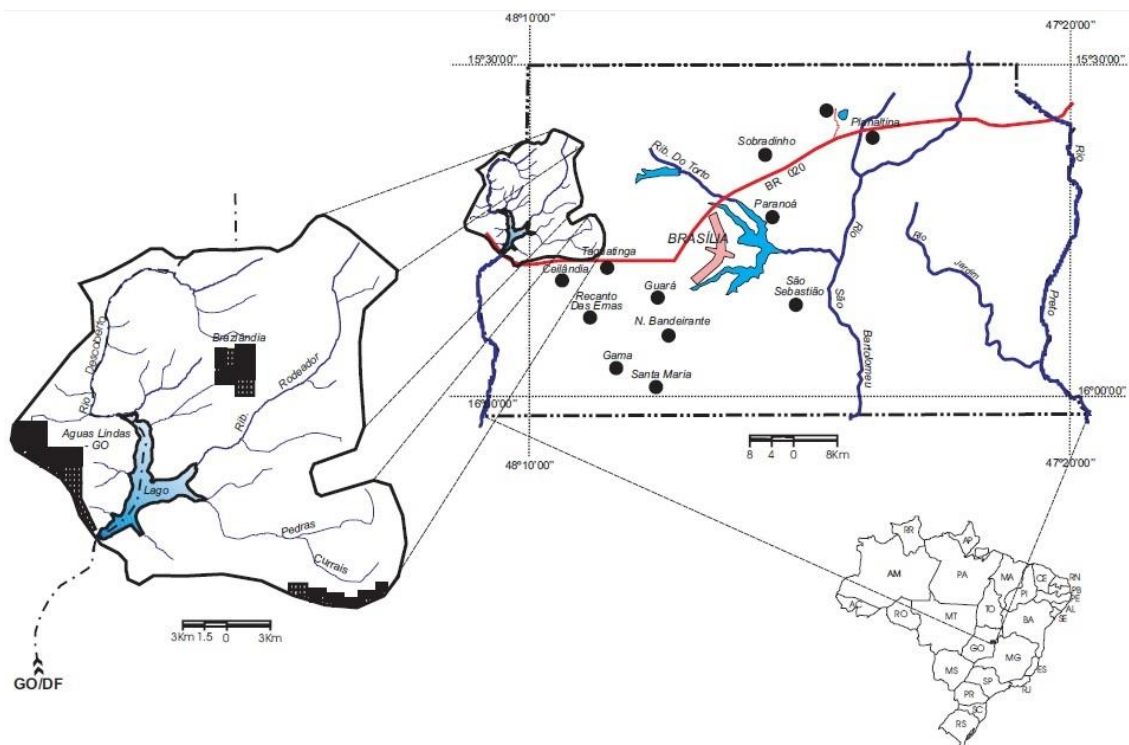


FIGURA 14. Localização da Bacia do Alto Descoberto.  
Fonte: Reatto et al. (2003)

A área de estudo possui clima tropical Aw segundo a classificação de *Koppen* com duas estações bem definidas: um período chuvoso de outubro a março e uma estação seca de

<sup>1</sup> h<sup>3</sup>: hectômetro cúbico. Equivalente a 1.000.000m<sup>3</sup>

abril a setembro (TEZA, 2008). Quanto à morfologia, a BHAD possui fator de forma (HORTON, 1932) de 0,644 e Índice de Circularidade (MULLER, 1953) de 0,603. Quanto à geomorfologia, predomina o relevo plano e suave ondulado, segundo classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2006). A figura 15 apresenta as classes de solo encontradas na BHAD. A maior parte da bacia é coberta por latossolos (vermelho e vermelho-amarelo), ocorrendo também cambissolos, gleissolos, plintossolos e neossolos quartzarênicos (REATTO et al., 2003).

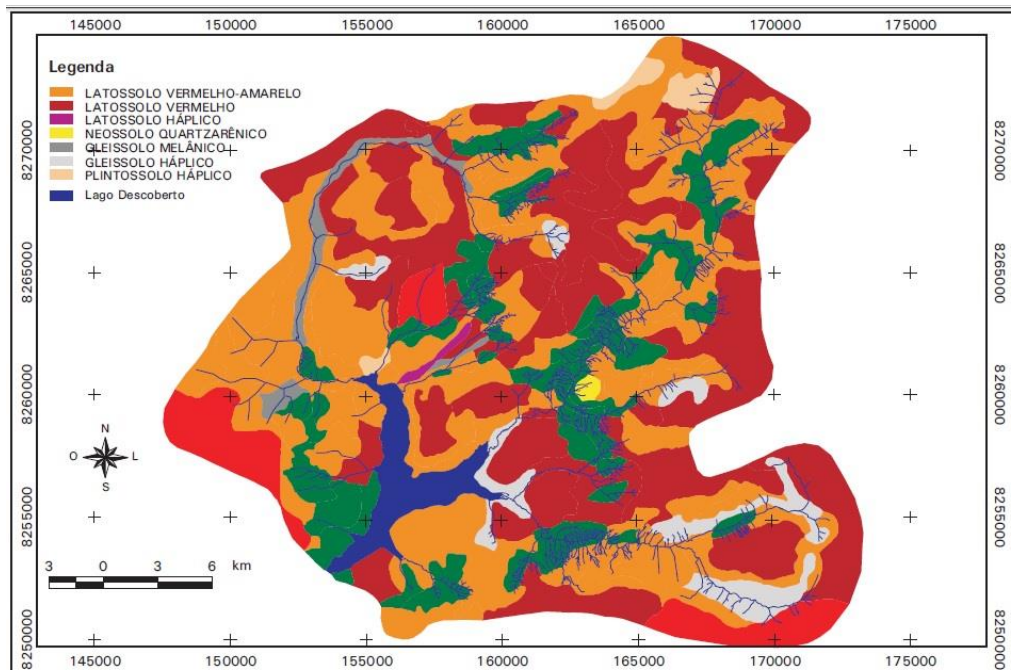


FIGURA 15. Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto  
Fonte: Adaptado de Reatto (2003)

Quanto ao uso do solo, a área em questão é bastante heterogênea. A figura 16 apresenta uma imagem do Satélite Landsat 8 da região da BHAD de agosto de 2015. Nessa é possível distinguir visualmente remanescentes de vegetação nativa (cerrados e matas) nas proximidades do reservatório do Descoberto e em parte da Floresta Nacional de Brasília, onde ocorrem, também, maciços de florestas plantadas; bem como áreas urbanas bastante adensadas como as cidades de Taguatinga, Águas Lindas e Brazlândia. Também é possível identificar áreas agrícolas e áreas com solo exposto.

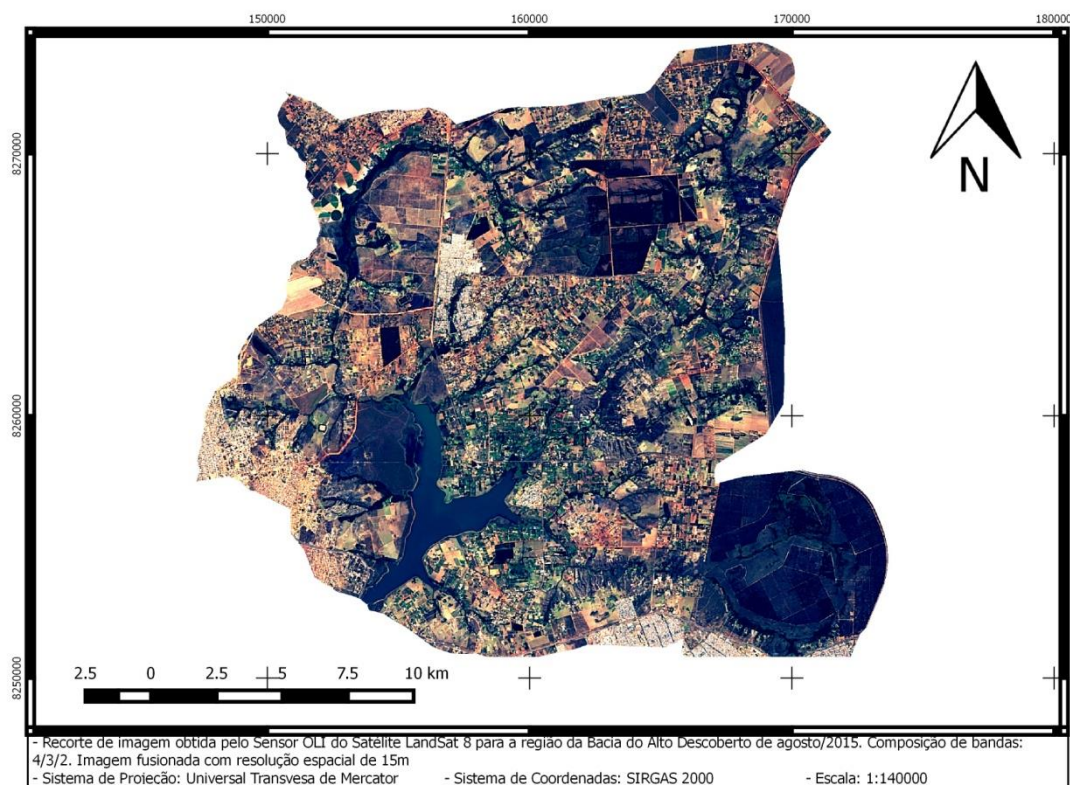


FIGURA 16. Recorte de imagem obtida pelo Sensor OLI do Satélite Landsat 8 para a região da Bacia do Alto Descoberto de agosto/2015. Composição de bandas: 4/3/2. Imagem fusionada com resolução espacial de 15m.

A BHAD vem sofrendo intensas alterações no uso da terra nos últimos anos. Desde a criação do Reservatório do Descoberto, em 1974, a região vem se destacando pelo potencial agrícola, principalmente pelas culturas de tomate, morango e goiaba. A cidade satélite de Brazlândia, a mais importante da bacia, possui a terceira maior produção morango do Brasil e é responsável por cerca de 60% do abastecimento de hortaliças do Distrito Federal (Distrito Federal, 2015).

Dada à sensibilidade ambiental e relevância estratégica, o Decreto n.º 88.940, de 7 de novembro de 1983, criou a APA do Descoberto, com 35.588 hectares (ha). Posteriormente o Governo do Distrito Federal criou, por meio do Decreto Distrital n.º 26.007, de 5 de julho de 2005, a Reserva Biológica do Rio Descoberto (Rebio Descoberto), cujos limites abrangem toda faixa de 125 metros a partir da orla do reservatório, na margem inserida no Distrito Federal.

Entretanto, a implantação de fato dessa Rebio nunca ocorreu por problemas fundiários. Segundo dados do IBRAM (2010), existem 72 chácaras no interior dessa Unidade de Conservação, muitas delas com produção agrícola. Além das unidades de conservação já citadas, existem mais duas no interior da BHAD: a Floresta Nacional de Brasília e o Parque Ecológico Veredinha, cujas áreas são apresentadas na figura 17.

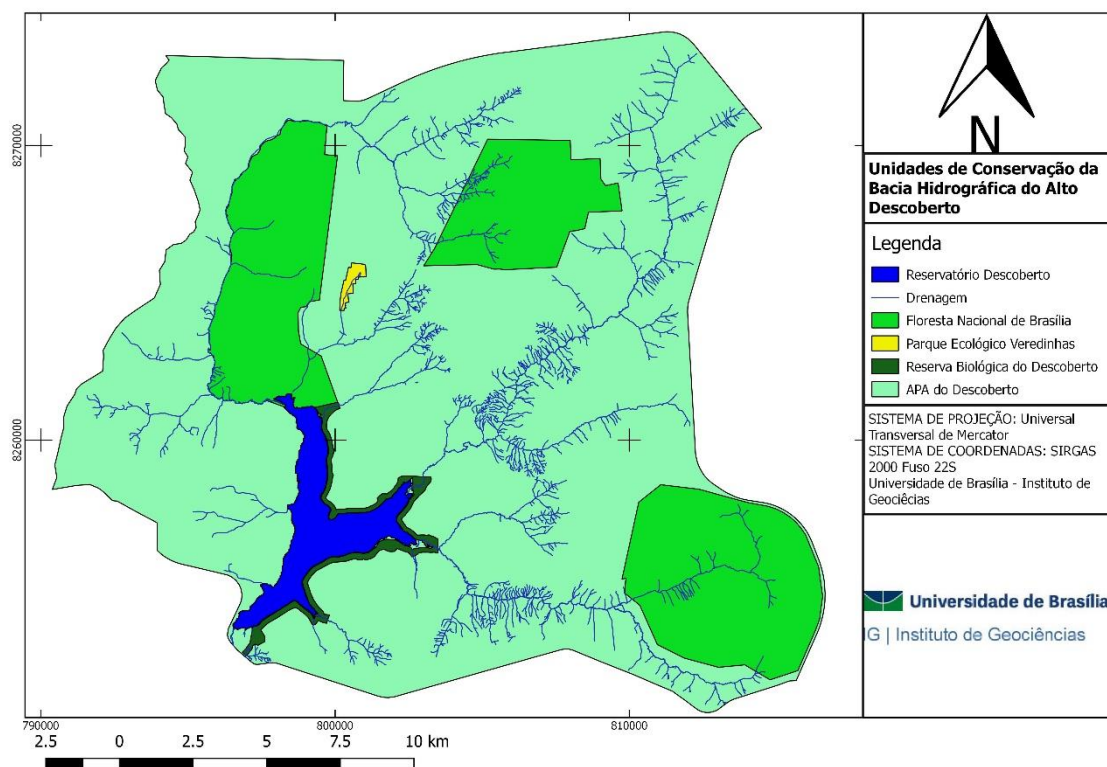


FIGURA 17. Unidades de Conservação da Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto  
 Fonte de dados: IBRAM

Ao longo dos anos a BHAD tem sofrido com a expansão das atividades agropecuárias e, mais recentemente, com as ocupações irregulares e adensamento populacional (DISTRITO FEDERAL, 2017). Nunes e Roig (2015), ao comparar o uso do solo da BHAD em 1994 e 2011, observaram uma redução de 37% para 31% e de 21% para 15% no percentual de área da bacia ocupada por campos nativos e formações savânicas, respectivamente. Ao mesmo tempo observaram um aumento de 11% para 22% de área ocupada pela agricultura e de 6% para 8% a área ocupada por construções e edificações. Ferrigo (2014), elaborou um mapa de uso do solo por meio de mapeamento cadastral na escala 1:3.000 com base em uma ortofoto com 24 cm de resolução espacial e obteve uma área urbana equivalente a 9,33% da área da bacia.

Conforme recente classificação de imagens de satélite realizada por Chelotti (2017) para a BHAD, com base em uma imagem do satélite Landsat 8 de agosto de 2015, apresentada na figura 18, aproximadamente 49% da área está ocupada por áreas agrícolas, 12% por áreas urbanas ou solo exposto, e apenas 35 % por remanescentes de vegetação nativa (campos, cerrados e matas).

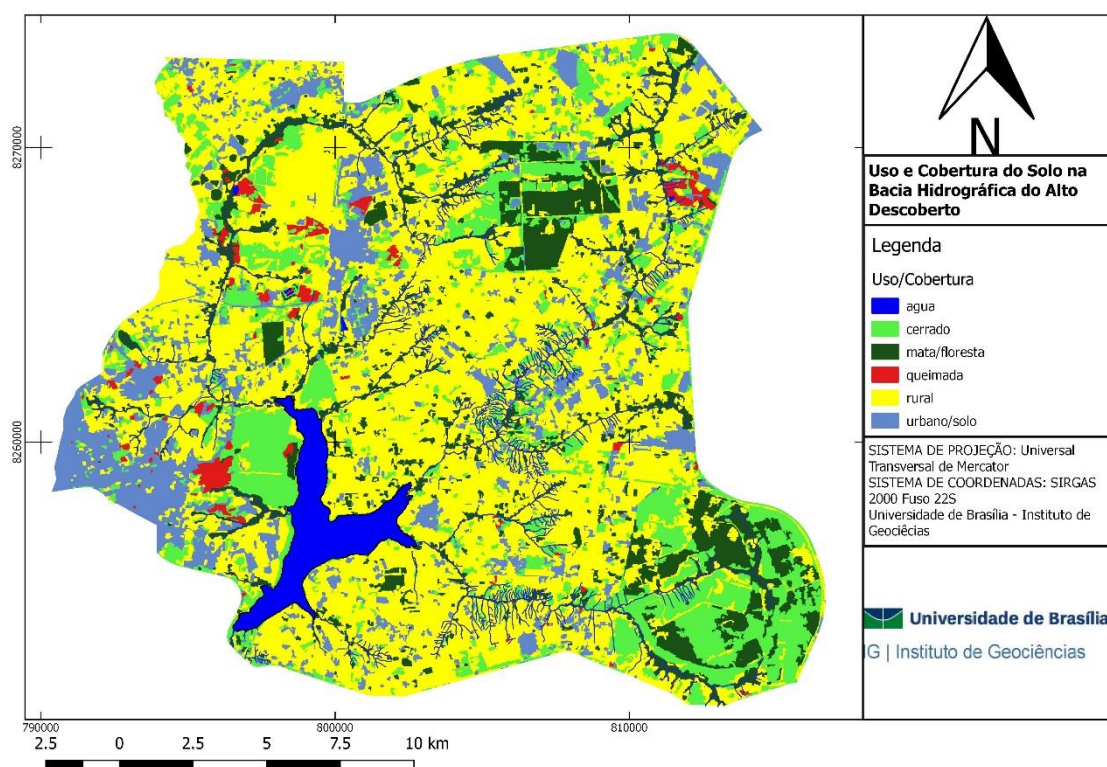


FIGURA 18 – Uso do solo da Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto em 2015.  
 Fonte: Adaptado de Chelotti (2017)

Fica nítido o avanço da agricultura e expansão urbana na BHAD. A severa mudança no uso do solo, associado ao crescimento populacional desordenado do DF e a um ano com índices pluviométricos extremamente baixos, levaram o reservatório do Descoberto ao seu menor nível da história: 11% em 19/10/2017 (ANA, 2017).

A situação atual do reservatório demanda esforços extremos para recuperar e preservar a principal fonte de água potável do Distrito Federal.

#### 4.2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Foram realizadas três campanhas de campo: em 15/3/2016, 9/10/2016 e 28/4/2017, sendo as duas primeiras datas de passagem do satélite Landsat 8 e a última, dia de passagem do satélite Sentinel 2. As datas foram escolhidas em função do calendário de passagem do sensor, da sazonalidade das chuvas e do hidrograma do reservatório de forma que em 15/3/2016 o reservatório encontrava-se em sua cota máxima, em decorrência de ser praticamente o fim do período chuvoso; em 9/10/2016 encontrava-se com 21% de sua capacidade, já tendo iniciado o período de chuvas; e em 28/4/2017 encontrava-se com 55% da sua capacidade, ao final do período chuvoso. O objetivo foi buscar caracterizar os diferentes



momentos do reservatório e seu comportamento quanto à concentração de sedimentos em suspensão.

As amostras de água foram coletadas nos principais *inputs* (pontos de entrada) do reservatório (córregos Rocinha, Coqueiro e Queimado; rio Descoberto; ribeirão Rodeador e ribeirão das Pedras); e também no centro e no exutório do reservatório, totalizando oito pontos por campanha de campo, conforme croqui apresentado na figura 19.

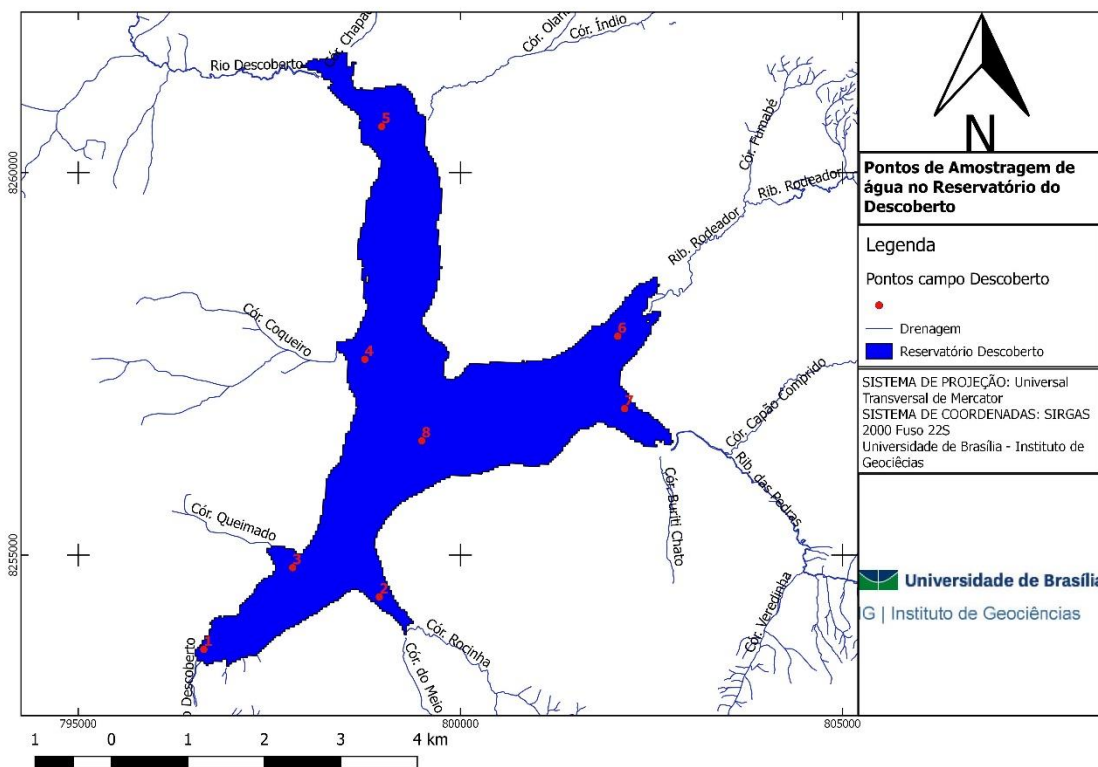


FIGURA 19. Croqui com esquema de pontos de amostragem de água no reservatório do Descoberto.

As amostras foram submetidas a análises de laboratório para determinação de CSS e também submetidas à espectrorradiometria de campo a fim de que se determinassem as propriedades óticas das amostras de água e a influência das propriedades físicas dos materiais em suspensão sobre suas propriedades.

As CSS das amostras foram determinadas por meio de filtragem utilizando-se filtros de papel de  $0,45\mu\text{m}$ , filtrando-se as amostras até a saturação dos filtros.

A determinação das propriedades óticas da água foi realizada com o espectrorradiômetro *Ramses*, do fabricante *Trios*. Esse equipamento consiste em um conjunto de três sensores hiperespectrais, sendo dois de radiância e um de irradiância, conforme apresentado na figura 20, com capacidade de detecção nas faixas do visível e NIR, tendo intervalo de detecção espectral de 320 a 950nm ao longo de 256 bandas (TRIOS, 2010). As principais especificações técnicas do *Ramses* são apresentadas na tabela 6.



FIGURA 20. Sensores espectrorradiômetros *Ramses*. O do centro mede irradiância incidente e os demais medem radiância.

Fonte: <http://www.trios.de/en/products/sensors/ramses.html>.

Tabela 6. Principais especificações *Trios - Ramses*

<b>Intervalo Espectral</b>	320 – 950 nm
<b>Tipo de Sensor</b>	Arranjo de 256 fotoídeos de silício
<b>Amostragem Espectral</b>	3,3nm/pixel
<b>Acurácia Espectral</b>	0,3nm
<b>Canais utilizáveis</b>	190
<b>FOV</b>	7°

Fonte: <http://www.trios.de/en/products/sensors/ramses.html>

Em cada coleta de campo o equipamento foi instalado em embarcação cedida pela CAESB, com o sensor de irradiância ( $E_d$ ) apontado para o céu, o sensor de radiância do céu ( $L_d$ ) com ângulo zenital de aproximadamente 40° e o sensor de radiância da água ( $L_u$ ), com 40° *off nadir*, conforme demonstrado na figura 21. Os valores dos ângulos para geometria de aquisição foram definidos com base em Villar (2013).

O funcionamento do espectrorradiômetro foi descrito no item 3.1.3. O principal componente radiométrico mensurado em campo com o uso desses equipamentos foi a reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{sr}$ ), que, para seu cálculo, aplica-se a seguinte equação:

$$R_{sr} = \frac{L_u q - f \cdot L_d}{E_d} \quad (13)$$

Onde  $f$  é um fator que varia em função do tamanho das ondas na superfície da água. Geralmente adota-se o valor 0,028, como sugere Mobley (1999).



FIGURA 21. Espectrorradiômetro instalado na embarcação.

#### 4.2.1 CALIBRAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM AS PROPRIEDADES ÓTICAS DA ÁGUA.

A propriedade óptica da água medida em campo que se relaciona de maneira direta com a reflectância medida por satélite é a reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{sr}$ ). A proposta de integração de dados para calcular as estimativas de CSS a partir dos dados de satélite envolve análises de correlação entre a reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{sr}$ ) com os valores de concentração de sedimentos e os valores de reflectância medidos pelo sensor orbital (MENEZES, 2013) MODIS, Landsat 8 e Sentinel 2.

Primeiramente, os valores de concentração de sedimentos obtidos em coleta de campo e laboratório foram correlacionados com as medidas de reflectância obtidas por espectrorradiometria de campo. Especificamente com os valores de reflectância obtidos pela simulação das bandas do vermelho e NIR dos sensores de interesse.

Os dados de reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{rs}$ ) adquiridos pela espectrorradiometria de campo foram utilizados para simular a reflectância dos sensores.

Posteriormente os valores de reflectância simulados para os sensores foram correlacionados com os dados de CSS mensurados em campo. A partir da curva de correlação obteve-se uma equação de regressão que explica a relação entre a reflectância e a concentração de sedimentos. Essa equação pode ser aplicada nas séries históricas do MODIS e nas imagens Landsat-8 e Sentinel 2 para se obter a estimativa da CSS.

### 4.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE

Os dados de reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{sr}$ ) adquiridos pela espectrorradiometria de campo são utilizados para simular a reflectância dos sensores orbitais MODIS, Landsat-8 e Sentinel 2.

O objetivo dessa etapa é simular como seria a medida de reflectância mais precisa feita pelos sensores, ou seja, sem contar com as atenuantes atmosféricas e os problemas de ruídos no processo de aquisição das imagens.

Cada banda de cada sensor possui posições e larguras diferentes, bem como diferentes funções de resposta dos detectores que compõem essas bandas. A figura 22 apresenta as funções de ganho de banda dos sensores MODIS e Landsat 8. A simulação ideal de reflectância de uma banda é feita com base no ganho de banda (BAPTISTA, 2014). Para simular as bandas no presente trabalho, foi utilizada a Equação 14 proposta por Rotta et al., (2016).

$$R_{rss} = \frac{\sum R_{rs}(\lambda) * s(\lambda)}{\sum s(\lambda)} \quad (14), \text{ onde:}$$

$R_{rss}$  é a reflectância simulada para um determinado sensor;  $\lambda$  é o comprimento de onda;  $R_{rs}$  é a Reflectância *in situ* medida pelo espectrorradiômetro para um determinado comprimento de onda da faixa espectral que compõe a banda; e  $S$  é a função de resposta dos detectores que compõe a banda.

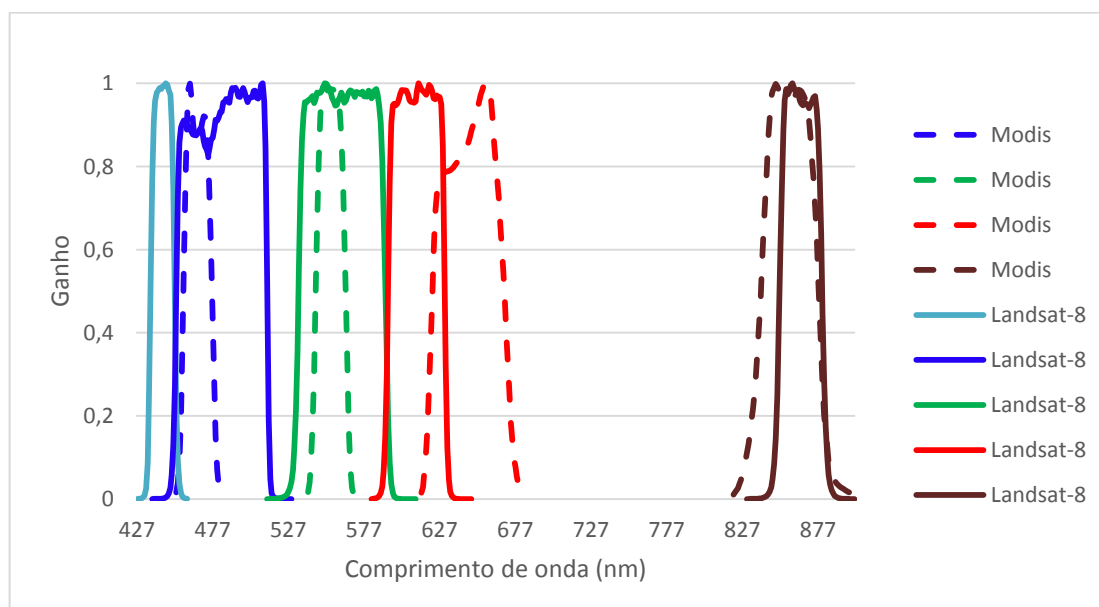


FIGURA 22. Funções de ganho de bandas dos sensores MODIS e Landsat 8 na faixa do visível e NIR  
Fonte de dados: NASA

A simulação das bandas dos sensores MODIS e Landsat 8 foram feitas com base na equação 15. Já para os dados Sentinel 2, para simular as bandas foram consideradas as reflectâncias dos comprimentos de onda do centro de cada banda, uma vez que as bandas

desse sensor são significativamente mais estreitas, conforme apresentado na figura 12, e a função de ganho de banda não apresenta diferenciação significativa em relação ao centro de banda.

Os valores de reflectância de superfície simulados para os sensores são correlacionados com os dados de CSS mensurados em campo. A equação de regressão definida pela curva de correlação é aplicada a série histórica de imagens de reflectância de superfície do MODIS, geradas pelo algoritmo MOD3R, e nas imagens dos sensores Landsat-8 e Sentinel 2 por meio de álgebra de mapas.

Os processamentos mencionados até agora são bastante semelhantes para ambos os sensores. Nos itens seguintes, serão apresentadas as peculiaridades de processamento em função das características de cada sensor.

#### 4.3.1 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS MODIS

No presente trabalho foram utilizadas as imagens dos satélites MODIS, produtos de reflectância da superfície MOD09 e MYD09 dos tipos A1 e Q1 descritas no item 3.3.1. Cada pixel MOD09 ou MYD09 contém a melhor observação diária para intervalo de 8 dias, selecionado com base no critério da qualidade de observação (ângulo de visada baixo, ausência de nuvens ou sombras de nuvens, e presença fraca de aerossóis). O intervalo de análise deste trabalho abrange todas as imagens disponíveis entre 2000 e 2017, compreendendo 18 anos.

Para se obter uma precisa análise espectral da água, é imperativo que se trabalhe exclusivamente com pixels puros de água. Ocorre que, quando a resolução espacial é baixa (250 e 500m, no caso do MODIS), é muito provável que mais de um alvo seja representado no mesmo pixel, ou seja, a informação espectral contida naquele pixel é função da resposta misturada de todos os alvos presentes na área registrada por ele.

O processo de mistura espectral depende da resolução espacial do pixel que muda a cada aquisição, já que o ângulo de aquisição numa imagem MODIS pode variar de -53 graus a +53 graus. Essa variabilidade, aliada a própria variação do espelho de água em função do período hidrológico, faz com que seja impossível, na maioria dos corpos de água continentais (rios, lagos), assegurar que um determinado pixel seja sempre um pixel representativo de água.

Dessa forma deve-se garantir que não ocorra mistura espectral dentro de um único pixel de forma se obter uma resposta espectral pura do alvo de interesse, que é a água. Para

alcançar esse objetivo são utilizadas técnicas de classificação de imagens, principalmente não supervisionadas no intuito de criar uma classe de pixels puros de água.

Um dos algoritmos utilizados para se obter pixels puros de reflectância em séries históricas é o “*MODIS River Reflectance Retrieval*” (MOD3R), desenvolvido pelo IRD (*Institute de recherche pour le developpement*), da França. O algoritmo desenvolvido para o programa determina com precisão e consistência ao longo do tempo os pixels puros de água em uma imagem, ou seus melhores candidatos, independentemente dos tipos de morfologia dos rios. Com a extração dos valores de reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho das imagens MODIS, é possível determinar as concentrações de superfície de sedimentos na água (ANA, não publicado).

O MOD3R permite processar automaticamente um grande número de imagens apenas informando a área de interesse na imagem através da seleção de uma máscara. A metodologia para extração do espectro da água é apresentada na figura 23.

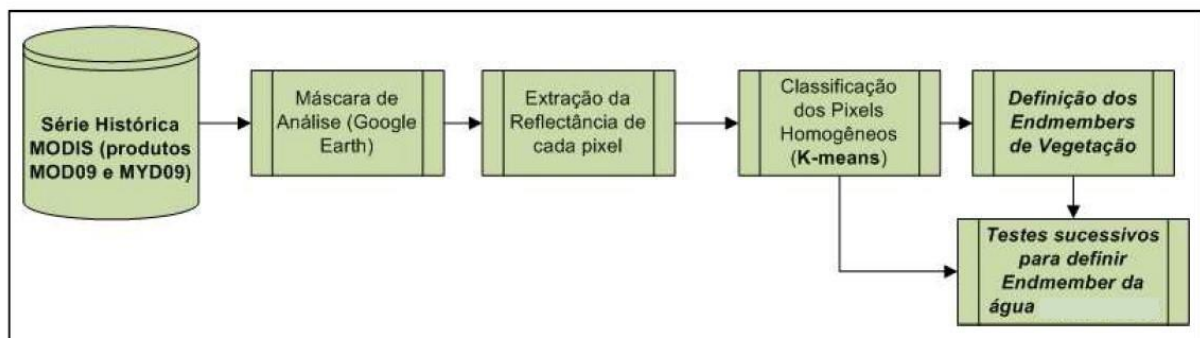


FIGURA 23. Fluxograma de processamento MOD3R

Fonte: Adaptado de Menezes (2013)

Para se obter todas as imagens que compõem a série histórica, foi utilizado o *software* GETMODIS, também desenvolvido pelo IRD, cuja função é justamente a aquisição de produtos MODIS MOD/MYD09Q1 e MOD/MYD09A1 no formato HDF em grandes quantidades. A máscara de análise é definida pelo usuário utilizando-se o *software* *Google Earth*, no formato aproximado do corpo d'água ou trecho de interesse a ser analisado. A figura 24 apresenta a máscara utilizada no presente trabalho. As dimensões da máscara foram definidas em função da variação de cota do reservatório, já evitando, previamente, misturas espectrais bem como do tamanho do pixel do MODIS.

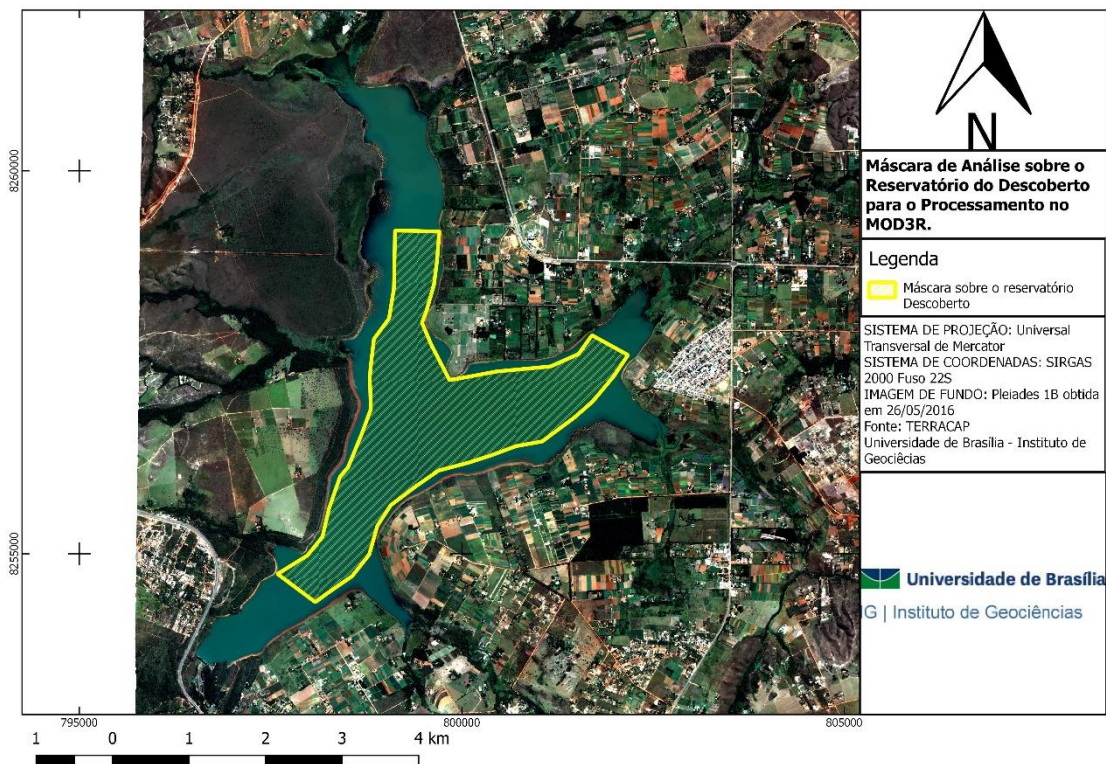


FIGURA 24. Máscara de análise sobre o reservatório do Descoberto para processamento no MOD3R, obtida pelo software Google Earth. Imagem de fundo obtida pelo sensor Pleiades 1B em 26/05/2016. Fonte da Imagem: TERRACAP (2016).

Primeiramente o MOD3R faz uma análise a partir da banda de qualidade dos produtos MOD/MYD09A1 (Resolução espacial de 500 metros), descartando as cenas de qualidade inferior e extraindo os de qualidade superior. A qualidade das imagens MODIS é afetada principalmente pelo ângulo de visada baixo, ausência de nuvens ou sombras de nuvens, e presença fraca de aerossóis (Menezes, 2013).

Posteriormente é feita a extração da reflectância dos pixels localizados no interior das máscaras predefinidas. Os valores de reflectância dos pixels são classificados em grupos homogêneos mediante a metodologia estatística de *K-means* (TOU e GONZALES, 1974).

Por meio do algoritmo estatístico *K-means*, são criados grupos homogêneos (*clusters*) de pixels. Este método de classificação não supervisionado busca formar K grupos, representados pelo centro do grupo (no espaço espectral) e da dispersão dos valores dos demais pixels no grupo determinado. A estimativa e classificação dos pixels em grupos (*clusters*) homogêneos são feitas da seguinte forma (ANA, não publicado):

1. Sorteio aleatório de K1 centros;
2. Cálculo da distância para cada pixel aos K centroides. Cada pixel é atribuído ao grupo cuja distância é mínima em relação a todos os centroides.

3. Atualização dos centroides conforme o novo grupo de pixel que forma o novo grupo.
4. Repetição dos passos 2 e 3 até a satisfação de um determinado critério de convergência.

No final do processo temos  $K$  grupos  $G_i$  com  $1 \leq i \leq K$ . Uma vez definidos os grupos é selecionado aquele que represente melhor o *endmember* de água.

Para isso, nas imagens MODIS estima-se o *endmember* da vegetação diretamente por meio da diferença máxima entre os valores de reflectância nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho. Por fim, cada grupo é testado como *endmember* da água e o grupo de pixels que produz o menor erro residual é selecionado.

Esse procedimento é repetido para cada imagem da série temporal e os valores de reflectância das bandas 1 e 2 (vermelho e NIR) dos pixels considerados puros são retornados em uma tabela.

Aos valores de reflectância de superfície do vermelho e infravermelho da aplicou-se a equação gerada pela curva de correlação descrita no item 4.2.1 para se obter os valores de concentração de sedimentos em função da reflectância medida pelo MODIS.

Cabe ressaltar que as medidas de reflectância do sensor MODIS são por unidade de área e as medidas do espectrorradiômetro *Trios* por unidade de ângulo sólido (estereorradiano). Portanto, os valores medidos pelo espectrorradiômetro devem ser multiplicados por  $\pi$  para que possam ser comparadas com os dados do sensor MODIS (MENEZES, 2013).

Os valores de CSS estimados pelo modelo foram comparados com dados mensurados em campo nos dias de coleta e com dados da CAESB.

#### 4.3.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT 8

Conforme explicado em 4.3.1, faz-se necessário trabalhar apenas com pixels puros de água para a correta mensuração dos componentes em seu interior.

Para se obter os pixels puros de água das imagens Landsat 8, foi utilizada a banda *CFmask*, que informa quais são os pixels puros de água, conforme explicado no item 3.3.1.2.

Definidos os pixels puros de água no reservatório, aplicou-se a equação gerada conforme item 4.2.1 para se obter os valores de CSS em função das bandas simuladas do vermelho e NIR do sensor Landsat-8.



Assim como o MODIS, as medidas de reflectância do Landsat 8 são por unidade de área enquanto as medidas do espectrorradiômetro *Trios* são por unidade de ângulo sólido, havendo necessidade de multiplicação dos valores de reflectância medidos por  $\pi$ .

Posteriormente, foi realizada a correlação diretamente entre a CSS medida e a reflectância dos pixels puros de água das imagens obtidas nas mesmas datas das coletas de campo (15/3/2016 e 9/10/2016). Para tal foi considerado o valor do pixel de coordenada mais próxima à coordenada do ponto de coleta de amostra de água.

Por fim os modelos gerados pela correlação entre CSS e reflectância *in situ* e CSS e reflectância obtida pelo sensor Landsat 8 foram comparadas com os dados de campo e da CAESB para se definir qual é o melhor modelo de estimativa de CSS.

#### 4.3.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS SENTINEL 2

Para o processamento das imagens Sentinel 2, utilizou-se os produtos nível 1-C. Esse produto é composto por imagens de 100 km<sup>2</sup> ortorretificados no sistema de projeção UTM/WGS 1984 com auxílio de um Modelo Digital de Elevação (MDE). As imagens são fornecidas em valores de reflectância no topo da atmosfera (reflectância TOA). Além disso, o produto nível 1-C inclui máscaras para diferenciar pixels de terra/água e de nuvens (ESA, 2015). Para obtenção desse produto, a imagem bruta é submetida aos seguintes pré-processamentos (ESA, 2015):

- Associação de feixes imageados: seleção das faixas de imageamentos pré-definidas que cruzam a cena da imagem.
- Reamostragem da grade para ortorretificação.
- Reamostragem de cada banda espectral na geometria da ortoimagem usando a grade reamostrada e um filtro de interpolação. O cálculo das reflectâncias TOA também ocorre nesta etapa.
- Cálculo de máscaras de nuvem e terra / água.
- Compactação de imagens da imagem resultante do Nível-1C para o formato JPEG2000 e de um cabeçalho codificado por GML.

Para a realização da correlação entre os dados de SR e dados de campo faz-se necessário converter as imagens de reflectância TOA para reflectância de superfície. O produto de reflectância de superfície do sensor Sentinel 2 é chamado de nível 2A e não é fornecido pela ESA, entretanto pode ser gerado a partir do produto nível 1C, por meio da

ferramenta *Sen2Cor*, na aplicação SNAP, desenvolvido pela ESA especificamente para manipulação de dados Sentinel 2 (Müller-Wilm, 2015).

O processamento para geração o produto 2A é dividido em duas partes: i) correção atmosférica, utilizando os algoritmos desenvolvidos por Ritcher, et al., (2011), que foram adaptados para o Sentinel 2; e ii) classificação temática automatizada da cena, descrita por Louis, Charantonis & Berthelot (2010).

O produto 2A contém, então, a imagem de reflectância de superfície e um mapa de classificação com quatro classes diferentes de nuvens e outras seis classes: sombras; sombras de nuvens; vegetação; solo/deserto; neve; e água (ESA, 2015).

Dada a incerteza quanto à qualidade da correção atmosférica promovida pelo *Sen2Cor* verificada na literatura (vide item 3.3.1.3) também foi realizada correção atmosférica das imagens nível 1C com o *software* Acolite.

Acolite é uma solução de correção atmosférica e processamento de imagens específica para imagens Landsat 8 e Sentinel 2. Esse software também retorna como resultado o produto nível 2A do Sentinel 2, executando uma correção atmosférica em duas etapas (Vanhellemont, e Ruddick, 2014., 2015):

- 1 - uma correção do espalhamento de Rayleigh, usando uma tabela de dados auxiliares gerada com algoritmo 6SV (Vermote et al., 2006); e
- 2 - uma correção de aerossol com base na suposição de que a cor escura das bandas na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR) sobre a água é causada pela altíssima absorção da água pura nessa região do espectro eletromagnético e no espectro exponencial da reflectância para o espalhamento dos aerossóis.

Foram testadas três formas de correção de aerossol no Acolite: i) A partir da banda 10 - SWIR1 (1600 nm); ii) a partir da razão entre a banda 8 – NIR (835 nm) e a banda 10; e iii) a partir da razão entre a banda 8 e a banda 11 – SWIR 2 (2200 nm).

Dessa forma, foram testadas 4 correções atmosféricas para o Sentinel 2, sendo uma utilizando o *software* *Sen2cor* e três, o *Acolite*.

A partir das imagens de reflectância de superfície geradas, realizou-se o recorte dos pixels puros de água com base nas respectivas máscaras de água, que podem ser extraídas a partir classe de água fornecida pelo mapa de classificação do produto nível 2A. Definidos os pixels puros de água, aplicaram-se as equações geradas pela correlação entre as CSS medidas em campo com os valores de reflectância *in situ* nos comprimentos de onda referentes aos centros das bandas 4, 5, 6, 7, 8 e 8a do Sentinel 2, conforme explicado no item 4.2.1.

Posteriormente os valores de CSS estimados foram comparados com os dados obtidos em campo e com os valores estimados com base nas imagens MODIS para se determinar quais dessas bandas são adequadas para a estimativa de CSS a partir das imagens Sentinel 2.

#### 4.4 VALIDAÇÃO

Para se verificar se os métodos testados para os diferentes sensores estimaram corretamente a CSS, as estimativas foram submetidas à validação por meio de comparação, seja com os dados coletados durante as campanhas de campo, seja com os dados de monitoramento hidrológico da CAESB.

A CAESB possui apenas uma estação de monitoramento no reservatório do Descoberto, que se localiza junto da barragem. Neste ponto é feita a coleta de amostras de água uma vez por mês. Entretanto, foi observada uma descontinuidade nas coletas, havendo diversos meses ao longo do período analisado em que não houve coleta ou que nem todos os parâmetros foram calculados.

Os parâmetros de qualidade da água monitorados pela CAESB são os definidos na Resolução Conama n.º 357, de 17 de março de 2005 para águas doces de classe 1 (CONAMA, 2005), entre eles a turbidez NTU, realizado pelo método nefelométrico, por meio de turbidímetro de bancada HACN – Modelo 2100N (CAESB, 2014); e sólidos totais em suspensão, realizado pelo método da filtração, com uso de papel filtro com 0,7 µm de porosidade (CAESB, 2016). Entretanto para esse último parâmetro existe uma grande ausência de medições durante a série histórica, dificultando a comparação. A maior parte dos meses em que houve coleta apresenta informação sobre turbidez, porém poucos meses apresentam informações sobre sólidos em suspensão.

O parâmetro medido pela CAESB que mais se aproxima dos sedimentos é a turbidez. Esse é um parâmetro altamente relacionado com a CSS, sendo seus valores comparáveis, possibilitando o uso daquela variável como medida indireta dessa (SARI et al. 2015). Em razão disso, as estimativas de CSS obtidas a partir do sensor MODIS também foram comparadas com a turbidez.

Dada a ausência de cobertura espacial dos dados da CAESB, a validação das estimativas de CSS a partir dos dados Landsat 8 e Sentinel 2 foram realizadas por meio da comparação das estimativas CSS obtidas pelos sensores com os valores calculados a partir das amostras coletadas em campo.

Para fins de comparação calculou-se a raiz do erro médio quadrático percentual (%RMSE) entre os valores estimados e os medidos em campo.

#### 4.5 COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO COM A DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

A série temporal de CSS produzida conforme item 4.3.1 foi analisada para verificação de tendência de acréscimo ou decréscimo desse parâmetro de qualidade da água ao longo do período analisado. Essa série, em conjunto com os mapas de dinâmica espaço-temporal de CSS produzidos pelos processamentos descritos em 4.3.2 e 4.3.3, foram comparados com mapas de uso e cobertura do solo produzidos e publicados na literatura especializada sobre o tema ao longo dos anos englobados na série temporal desse estudo (NUNES e ROIG, 2015); (FERRIGO, 2014); (CHELOTTI, 2017).

Como cada mapa possui tipos e quantidades de classes diferentes, buscou-se extrair o percentual de área coberta por vegetação de cada mapa de uso e classificação do solo para comparar se a redução da área com remanescentes de vegetação nativa influenciou no comportamento da CSS no período analisado.

Para a comparação temporal, calculou-se a CSS média anual a partir dos resultados obtidos pelos processamentos descritos no item 4.3.1.

## 5 RESULTADOS:

A partir dos dados de monitoramento hidrológico da CAESB, é possível observar alta relação entre a pluviosidade e turbidez.

Conforme os dados de monitoramento da CAESB apresentados na Figura 25, observa-se que a turbidez atinge seu máximo justamente no meio do período chuvoso e no mês mais chuvoso (janeiro) da série histórica de pluviosidade da BHAD, decrescendo nos meses seguintes acompanhando o comportamento sazonal das chuvas.

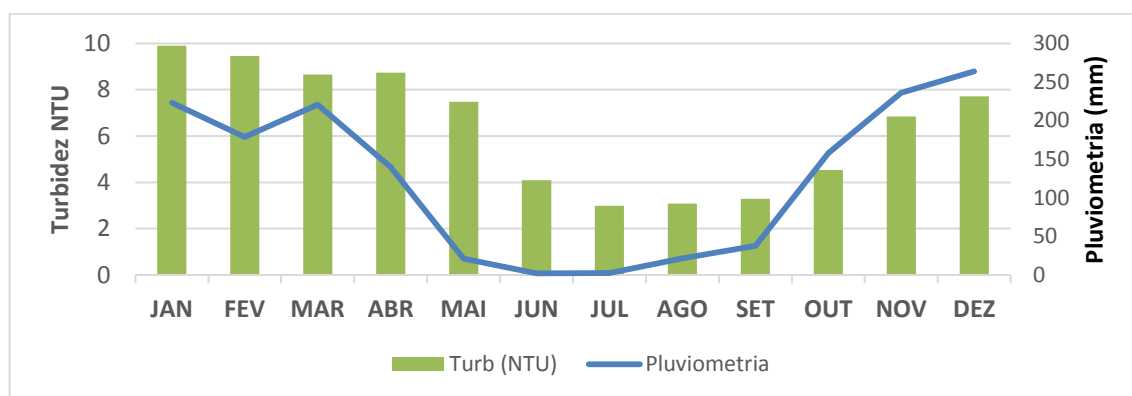


FIGURA 25. Comportamento sazonal da Turbidez e da Pluviosidade no reservatório do Descoberto entre 2000 e 2016

Fonte de dados: CAESB e ANA

Analisando-se os dados ao longo da série histórica, é possível observar que a turbidez acompanha a variação da pluviosidade. A figura 26 apresenta a variação histórica da pluviosidade e da turbidez entre os anos de 2000 e 2017. Um aumento de chuvas acarreta em aumento da Turbidez e, de maneira geral, quanto maior a pluviosidade, maior a turbidez. O leve deslocamento à direita da linha da turbidez indica o lapso temporal entre as chuvas e seu respectivo efeito sobre esse parâmetro de qualidade da água, medida no exutório. A descontinuidade da linha referente à turbidez ocorre em função da ausência de coleta de dados nesses meses.

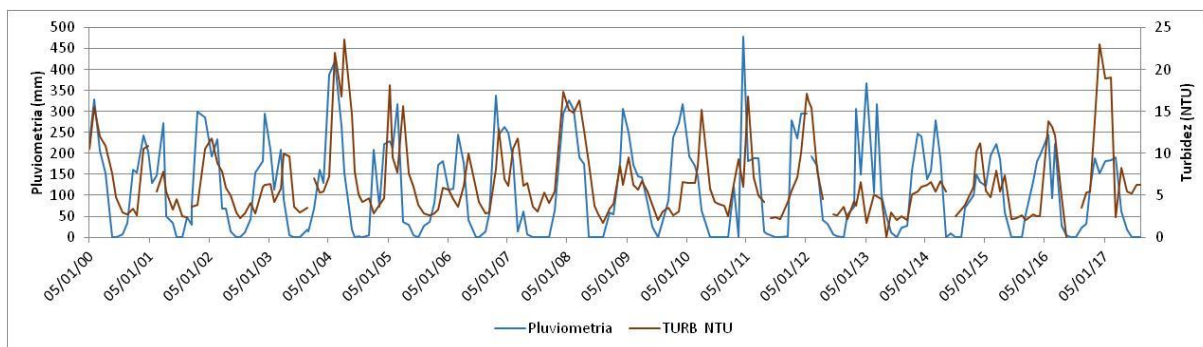


FIGURA 26. Variação temporal da Pluviosidade e da Turbidez no reservatório do Descoberto, entre 2000 e 2017  
Fonte de dados: CAESB e ANA (2017)

Chama-se atenção à dois picos de maior turbidez: o primeiro ocorrido no início de 2004, quando o Distrito Federal registrou a segunda maior pluviometria para o mês de janeiro (420 mm) desde o início da série histórica de medições na BHAD, em 1979, demonstrando a forte relação entre chuvas e sedimentos; e o segundo ocorrido no início de 2017, na qual todos os meses do período chuvoso (outubro de 2016 a abril de 2017) apresentaram pluviometria abaixo da média histórica (ANA, 2017).

A alta turbidez a despeito da baixa pluviometria nesse último ano pode ser explicada pelo baixo nível do reservatório no período, quando esse atingiu seus menores níveis já registrados (ADASA, 2017). Conforme demonstrado no item 5.3, a turbidez não é influenciada apenas pela pluviometria. A cota do reservatório também interfere na presença de sedimentos na água. Quanto menor a cota de um reservatório no momento de uma chuva, maior o efeito dessa na CSS.

### 5.1 MENSURAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO A PARTIR DAS COLETAS DE CAMPO.

Com base nos dados coletados em campo e análises em laboratório, conforme descrito em 4.2, obteve-se as CSS nos oito pontos coletados em cada campanha de campo apresentadas na tabela 7.

Tabela 7. Concentrações de sedimentos em suspensão obtidos a partir das coletas de campo em oito pontos no reservatório do Descoberto

Ponto	Concentração de Sedimentos em suspensão (mg/L)		
	Coleta em 15/3/2016	Coleta em 9/10/2016	Coleta em 28/4/2017
<b>1 (barragem)</b>	7	4,2	3,2
<b>2 (cor. Rocinha)</b>	8,4	7,2	3,9
<b>3 (cor. Queimado)</b>	5,8	5,2	3,0
<b>4 (cor. Coqueiro)</b>	6,2	11,2	3,1
<b>5 (rio Descoberto)</b>	8,4	18	3,6
<b>6 (rib. Rodeador)</b>	7,2	6,6	4,0
<b>7 (rib. Das Pedras)</b>	6,8	13,6	4,2
<b>8 (centro)</b>	6,4	4,2	3
<b>Média</b>	<b>7,02</b>	<b>8,77</b>	<b>3,52</b>

Observa-se que no fim do período chuvoso (15/3/2016), o maior volume de água do reservatório reduz a variabilidade das concentrações analisadas, tornando o lago bastante homogêneo e com concentrações baixas de sedimentos. Já no início do período chuvoso (9/10/2016), com o baixo nível do reservatório associado ao grande volume de sedimentos carregados pelas primeiras chuvas, a concentração de sedimento aumenta, havendo acréscimos mais significativos nos *inputs* mais volumosos, como por exemplo, o rio Descoberto (Ponto 5) bem como nos que sofrem maiores interferências antrópicas, como o córrego Coqueiro (Ponto

4), que recebe descargas da cidade de Águas Lindas/GO e o ribeirão das Pedras (Ponto 7), que recebe descargas da cidade de Brazlândia/DF.

Já no início da estiagem (28/4/2017), observa-se uma concentração ainda menor de sedimentos e uma alta homogeneidade do lago. Ressalta-se que o período chuvoso de 2016/2017 apresentou pluviometrias significativamente abaixo da média histórica (ADASA, 2017; ANA, 2017), o que resultou em uma menor carga de sedimentos do que o esperado para o período.

Apesar da variabilidade sazonal, os valores de concentração de sedimentos encontrados no reservatório do Descoberto são considerados baixos em comparação com outros reservatórios brasileiros, uma vez que raramente a CSS supera 20mg/L nesse reservatório.

## 5.2 PROPRIEDADES ÓTICAS DAS ÁGUAS DO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO.

As assinaturas espectrais adquiridas por espectrorradiometria de campo apresentam o comportamento das águas do reservatório do Descoberto. A reflectância da água depende dos componentes que se encontram no meio aquático (MENEZES, 2013). A partir da figura 27, é possível observar que o pico de reflectância em todas as amostras apresenta-se na região do verde (aproximadamente 550 nm). O pico nessa faixa do espectro eletromagnético é típico de águas interiores com baixas CSS, até 100 mg/L. À medida que se aumentam as concentrações, o pico de reflectância começa se deslocar em direção à faixa do vermelho e infravermelho (JENSEN, 2009).

Analisando-se as respostas espectrais dos diferentes pontos amostrados no reservatório do Descoberto, é possível realizar uma análise espacial da CSS. De maneira geral, observam-se maiores valores de reflectância nas zonas de entrada (inputs) do reservatório, em especial pontos 4 (córrego Coqueiro); 5 (rio Descoberto); 6 (ribeirão Rodeador) e 7 (ribeirão das Pedras), e valores menores na zona central e no exutório da barragem (pontos 1 e 2). A figura 27 apresenta a assinatura espectral de cada ponto amostrado no reservatório e suas respectivas CSS, realizadas em laboratório a partir das coletas de campo, bem como as médias das respostas espectrais dos oito pontos amostrados para cada dia de coleta.

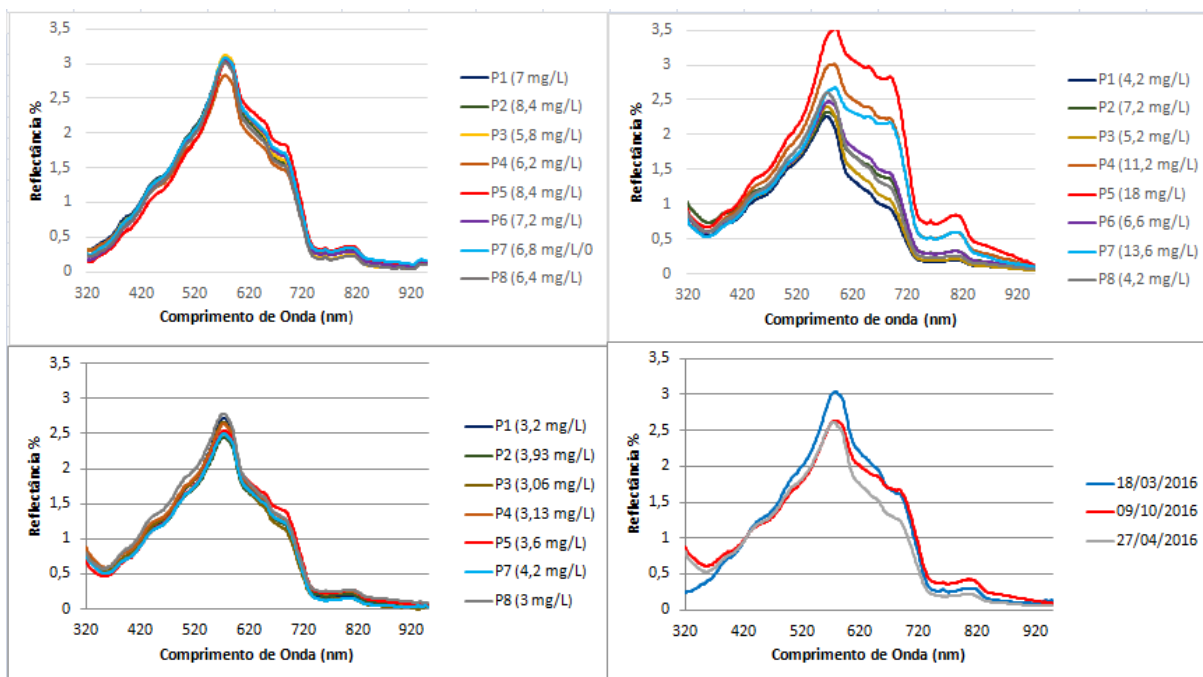


FIGURA 27. Assinaturas espectrais e suas respectivas CSS dos pontos amostrados no reservatório do Descoberto em 15/3/2016 (27a); em 9/10/2016 (27b), 28/4/2017 (27c) e média das respostas espectrais de cada dia de coleta (27d).

Os baixos valores de reflectância nos menores comprimentos de onda do espectro eletromagnético observado em todas as assinaturas espectrais são decorrentes da intensa absorção nessa faixa do espectro causada pela presença de CDOM e sedimentos, conforme explicado nos itens 3.2.1 a 3.2.1.4. Os picos de reflectância em 580nm na figura 27a e em 600nm na figura 27b indicam um deslocamento do espectro do verde para o vermelho. O deslocamento para o vermelho é indicador de que há um aumento da CSS.

A maior variação espectral é verificada na região do vermelho, entre 620 e 690nm, trecho onde a CSS tem forte influência na resposta espectral. Também é possível verificar formação destacada de uma ombreira na região dos 700nm e alterações significativas no espectro na região do NIR, onde as CSS mais altas também levaram a aumentos na reflectância, seguido de uma redução abrupta da reflectância até tender a zero no infravermelho médio.

Pela análise dos gráficos é possível perceber maior homogeneidade do reservatório no fim do período chuvoso (Figura 27a) e no período de estiagem (Figura 27c), uma vez que as curvas espectrais dos 8 pontos amostrados são muito similares assim como a variância da CSS, que é bem menor (0,92). Já no início do período chuvoso (Figura 27b), observam-se diferenças significativas entre as curvas espectrais, principalmente nas regiões do vermelho e NIR, denotando maior variabilidade na CSS ao longo do reservatório, fato também observado pela maior variância da concentração de sedimentos nesse período (25,16).



Os picos de reflectância nas regiões do vermelho e infravermelho indicam a existência de uma relação direta entre a reflectância nessas regiões e a concentração de sedimentos.

Chama atenção a alta homogeneidade e baixo albedo verificado na figura 27c, que pode ser explicada pela baixa pluviometria do período chuvoso anterior em relação à média história do período (ANA, 2017), que resultou nas menores CSS e variância (0,23) verificadas.

A baixa pluviometria interfere na CSS de duas formas. A primeira é que quanto menos chuva, menor a erosão e conseqüentemente menor o transporte de sedimentos até os rios afluentes, que, por sua vez, também tem suas vazões reduzidas em função da escassez de chuva, resultando em um menor aporte de sedimentos. A segunda é que a vazão reduzida dos rios faz com que a água entre no reservatório com menos energia, diminuindo o revolvimento do fundo do reservatório e favorecendo uma maior sedimentação do sedimento em suspensão na água.

### 5.3 ANÁLISE TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM BASE NOS DADOS MODIS.

A série temporal de 17 anos de dados MODIS totalizou 1339 imagens que foram processadas pelo algoritmo MOD3R e foram selecionadas 589, as quais apresentaram qualidade aceitável, conforme os critérios explicitados no item 4.3.1 e foram utilizadas para extrair a reflectância de superfície da água.

Os gráficos da figura 28 mostram a correlação entre os valores de CSS e as reflectâncias de sensoriamento remoto (Rrs) das bandas simuladas do vermelho e NIR do sensor MODIS.

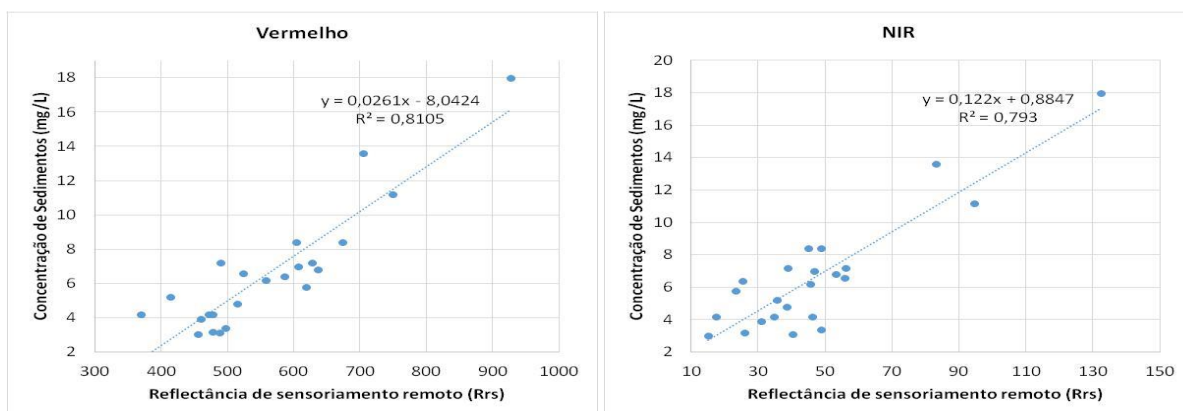


FIGURA 28. Correlação da Rrs das bandas simuladas do vermelho (28a) e NIR (28b) dos satélites MODIS com as concentrações de sedimentos medidas em campo.

Os valores de Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) foram 0,8105 e 0,793 para as bandas simuladas do vermelho e NIR do MODIS, respectivamente.

Isso indica que para o MODIS a banda que melhor explicaria a concentração de sedimentos é a banda 1 (vermelho). Entretanto, como os valores de  $R^2$  são muito próximos para as duas bandas (B1 – vermelho e B2 – NIR), foram testadas as equações 16 e 17 foram testadas para estimar a CSS a partir dos dados MODIS.

$$CSS = 0,0261 * B1 - 8,0424 \quad (15)$$

$$CSS = 0,122 * B2 + 0,8847 \quad (16), \text{ onde:}$$

CSS é a concentração de sedimentos em suspensão, B1 é o valor de reflectância de superfície da banda 1 do sensor MODIS e B2 é o valor de reflectância de superfície da banda 2 desse sensor.

Os valores de  $R^2$  obtidos para essas duas bandas podem ser considerados satisfatórios quando comparados às equações de estimativas de sedimentos apresentadas na Tabela 2, indicando que os modelos propostos no presente trabalho aparentam ser bons estimadores de CSS.

Para verificar qual dos dois modelos de fato melhor estima a CSS, eles foram aplicados à série temporal do MODIS e seus resultados submetidos à validação. As figuras 29 e 30 apresentam as séries temporais de CSS no reservatório do Descoberto a partir dos dados MODIS, com base nas equações 15 e 16, respectivamente, bem como os valores de Turbidez medidos pela CAESB (não publicado) no mesmo período. Os pontos em azul referem-se a dias de medição da CAESB em datas próximas às datas de restituição de imagens MODIS. Os pontos em vermelho referem-se a dias de medição da CAESB exatamente no mesmo dia da restituição de uma cena MODIS utilizada na estimativa da série temporal.

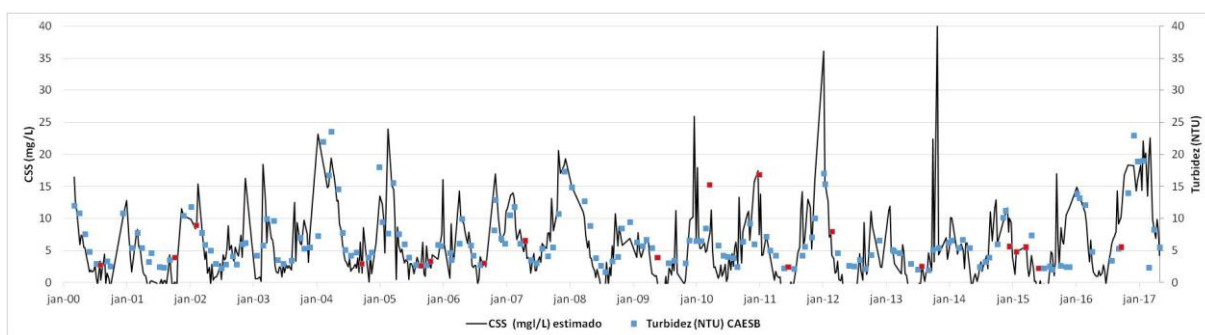


FIGURA 29 - Variação temporal da CSS com base em dados MODIS a partir da banda do vermelho (B1) entre 2000 e 2016.

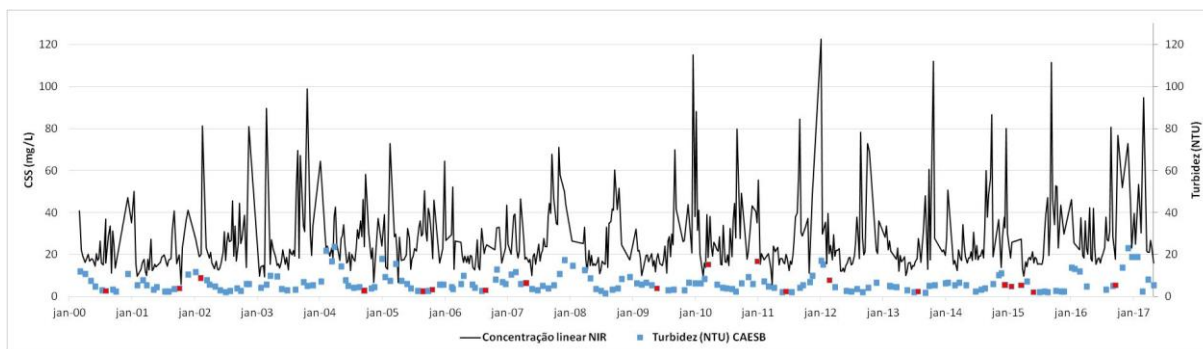


FIGURA 30 - Variação temporal da CSS com base em dados MODIS a partir da banda do NIR (B2) entre 2000 e 2016.

Da análise dos gráficos é possível perceber que ambos modelos foram capazes de captar a variação sazonal da concentração de sedimentos: maior nos meses de chuva (outubro a abril) e menor nos meses de estiagem (maio a setembro). Entretanto o modelo proposto pela equação 16 superestimou as CSS. Isso pode ser explicado pela interferência atmosférica proporcionalmente maior na banda do NIR, fazendo com que os valores de reflectância de superfície dessa banda sejam sensivelmente maiores do que os medidos pela espectrorradiometria de campo. A interferência no NIR em águas interiores já foi observada por diversos autores como Olivetti et al., (2016) e Dekker et al (2002). Como nessa região do espectro, a reflectância da água já é naturalmente muito baixa (JENSEN, 2009) qualquer interferência atmosférica, por menor que seja, é proporcionalmente maior do que em regiões do espectro onde a reflectância da água é maior, propagando esse erro para a estimativa de CSS.

A banda do NIR também recebe uma maior contribuição de adjacência dos pixels vizinhos em comparação à banda do vermelho. Os efeitos de adjacência são um processo óptico-físico causado pela dispersão molecular e de aerossóis, onde a visão do alvo é afetada pela radiação refletida nas superfícies da vizinhança (TANRE et al., 1981). Nas águas interiores, esses efeitos são mais evidentes devido à sua menor reflectância em relação às superfícies vizinha, como vegetação em torno dos reservatórios (STERCKX, 2015).

Como o entorno do reservatório é, basicamente, coberto por vegetação, o grande contraste de resposta espectral entre as superfícies da vegetação e da água contribui para distorções espectrais dos pixels de água mais próximos à margem. Esse efeito é mais intenso na banda NIR (MARTINS et al., 2017).

Como os pixels do MODIS na banda 2 possuem 250m de resolução espacial, a área afetada por essa contribuição torna-se significativa em relação à área total da máscara. Como o MOD3R retorna apenas um valor de reflectância de superfície para todos os pixels puros de

água inseridos na máscara, esse efeito contribui para a elevação do valor de refletância em B2, e, conseqüentemente, contribuindo para a superestimação da CSS a partir dessa banda.

Já o modelo proposto pela Equação 15 possui um ajuste mais adequado, no qual os valores estimados de CSS são muito próximos os valores de turbidez medidos pela CAESB.

Em que pese a turbidez ser uma medida indireta da concentração de sedimentos, há alta correlação entre os dois parâmetros, de forma que a alta similaridade entre os valores de Turbidez e os valores de concentração estimados indica que o modelo proposto pela equação 16 está satisfatório para estimação de CSS a partir da banda do vermelho do sensor MODIS. A figura 31 apresenta a correlação entre Turbidez e CSS a partir de dados coletados em campo no reservatório do Descoberto e no lago Paranoá (OLIVIETTI, não publicado) entre 2016 e 2017:

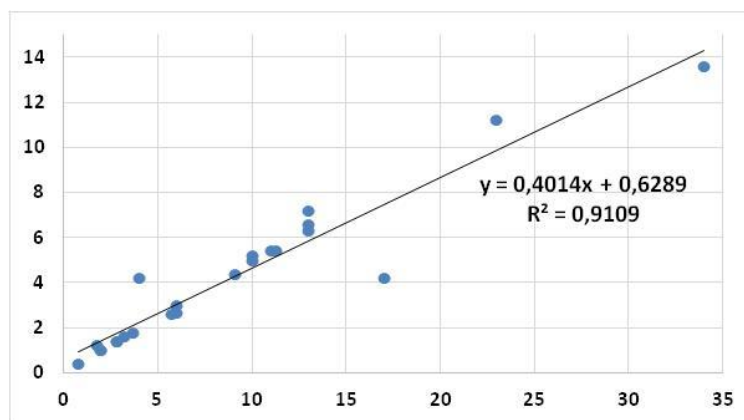


FIG. 31. Correlação entre Turbidez NTU e CSS a partir de dados coletados em campo no reservatório do Descoberto e no Lago Paranoá.

A partir dessa correlação, os valores de Turbidez fornecidos pela CAESB medidos nas mesmas datas de restituição das imagens MODIS (pontos em vermelho da figura 29) foram convertidos em CSS e comparados com os valores estimados a partir da Equação 15. Dessa comparação, observou-se que o modelo proposto apresenta Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (RMSE%) de 46,74%, havendo uma tendência sutil de superestimação da CSS por esse modelo.

Complementando a validação, os valores estimados de CSS pela banda 1, foram também comparados com os valores medidos durante as campanhas de campo. Como o MOD3R retorna a média dos valores de pixel no interior da máscara, optou-se por comparar os valores estimados com a média dos 8 pontos amostrados. A tabela 8 apresenta a comparação dos valores medidos em campo e os estimados de CSS.

Tabela 8. Comparação entre CSS média medida em campo e estimada pela banda 4 do MODIS

Datas de coleta	CSS média (mg/L)	
	Medida em campo	Estimada por B1

<b>15/03/2016</b>	7,025	9,74
<b>09/10/2016</b>	8,775	10,29
<b>27/04/2017</b>	3,519	6,91

Assim como na análise da RMSE%, os valores estimados são levemente maiores do que os medidos em campo. Esse efeito pode ser explicado pela ocorrência simultânea de dois fenômenos. O primeiro é a contribuição de adjacência, já citado. O segundo é o fato de ter sido aplicada uma única máscara no reservatório, fazendo com que os pixels das bordas, com maior reflectância, elevem o valor médio da CSS.

Dado o tamanho reduzido do reservatório, bem como a variação sazonal da cota, considerando o tamanho do pixel do MODIS, somente foi possível o uso de uma única máscara, ao invés de diferentes máscaras para os braços ou seções do reservatório, que melhoraria a precisão das estimativas.

Além disso, os valores de turbidez utilizados para a correlação apresentada na Figura 30 são obtidos junto à barragem (Figura 19, ponto 1), onde a turbidez é menor e, conseqüentemente a CSS correspondente. Isso ajuda a explicar o porquê dos valores de CSS estimados pela Equação 16 serem maiores que os gerados a partir da correlação apresentada na figura 20. Aqueles refletem a CSS média do reservatório, enquanto esses refletem a CSS do ponto com menor turbidez.

Rego (2017), ao analisar diversos modelos de estimativa de CSS em águas interiores, observou que a maioria dos modelos para corpos hídricos com baixa CSS ( $CSS \leq 100$  mg/L) apresentaram RMSE% superiores a 30%, possivelmente em razão da menor variação desse parâmetro nessas águas.

Considerando o ajuste do modelo em relação à turbidez, apresentado na figura 29, e as razões acima descritas pelas quais observa-se a tendência de superestimação, nota-se que a equação 15 possui limites inferiores e superiores de aplicação. Para valores de reflectância de superfície abaixo de 300, a equação 15 retorna valores negativos de CSS, já para valores de reflectância acima de 1000 a equação retorna valores muito elevados, acima dos já encontrados no reservatório. Essas limitações do modelo estão associadas aos valores mínimos e máximos de concentração encontrados em campo, bem como a adoção do modelo linear de regressão para geração da equação 15.

Em que pese os modelos polinomiais de segundo e terceiro grau apresentassem  $R^2$  levemente superiores ao modelo linear, a aplicação desses modelos à série histórica retorna valores de CSS sensivelmente superestimados, não apresentando bom ajuste. Ressalta-se que Rego (2017), ao testar diversos modelos de regressão para estimar a CSS a partir de dados de

espectrorradiometria de reflectância de campo em águas interiores na América do Sul, observou que o modelo linear é o mais indicado para avaliar a relação entre CSS e reflectância para baixas concentrações ( $CSS < 100 \text{ mg/L}$ ).

Portando, é possível determinar um limite seguro de estimativa de CSS a partir da equação 15 com reflectâncias de superfície variando entre 400 e 1000, denotando ótima capacidade do sensor em detectar variações de concentrações de sedimentos, mesmo em águas com baixas concentrações.

A partir da série temporal obtida foi possível determinar o comportamento sazonal da concentração de sedimentos do reservatório do Descoberto. A figura 32 apresenta comparação das médias mensais de CSS do reservatório do Descoberto, com a pluviometria.

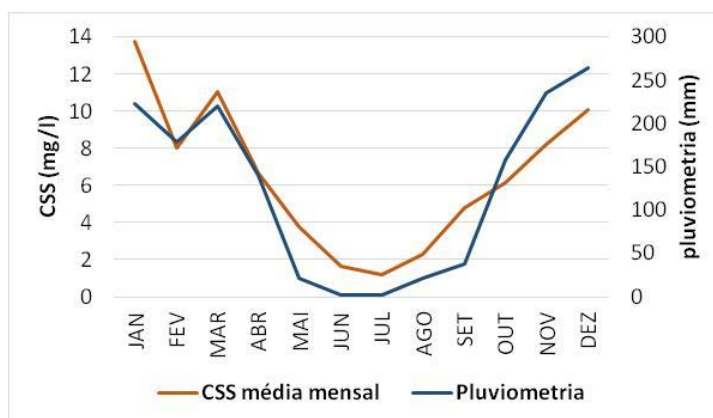


FIGURA 32. Comportamento sazonal da CSS no reservatório do Descoberto e sua associação com a pluviometria.

Observa-se que a concentração de sedimentos sofre influência direta da pluviometria, dada a semelhança entre as duas curvas. Chama-se atenção ao fenômeno de retorno de sedimentos ocorrido no mês de março, que pode ser explicado por uma menor quantidade de chuvas no mês de fevereiro em relação a março, ocorridos especialmente nos anos 2010, 2016, e 2001, quando choveu 37,2mm; 81,9mm; e 105,9mm, respectivamente. Bem abaixo da média histórica do mês para o período (178,88mm).

A forte relação entre pluviometria e concentração de sedimentos também explica os picos de concentração de sedimentos observados na figura 29. Esses picos ocorreram em razão de chuvas históricas ocorridas nos períodos. A Tabela 9 apresenta as cinco maiores concentrações de sedimentos estimadas na série histórica e a pluviometria dos 10 dias anteriores a esse evento.

Tabela 9. Picos de concentração de sedimentos e pluviometria associada

<b>Data do Evento</b>	<b>CSS estimado (mg/L)</b>	<b>Pluviometria dos 10 dias anteriores (mm)</b>	<b>Percentual equivalente de chuva esperada para o mês</b>
<b>26/01/2004</b>	23,15	172,7	77,47664
<b>06/03/2005</b>	23,95	249,1	112,9012
<b>09/01/2010</b>	25,90	102,3	45,89381
<b>25/01/2012</b>	36,09	200,3	89,85855
<b>09/11/2013</b>	40,35	97,3	41,23537

Em todos os eventos choveu mais do que o esperado para o período, aumentando significativamente a concentração de sedimentos. Chama-se atenção ao pico verificado em 6/3/2005, onde em dez dias choveu mais do que o esperado para o mês todo, causando o efeito de retorno de sedimentos; e ao pico de 9/11/2013. Em que pese a quantidade de chuva não ser muito maior do que o esperado para o período, o fato de acontecer mais perto do início da estação chuvosa, onde a cota do reservatório está mais baixa em relação às demais datas, aumentou significativamente a concentração de sedimentos, apesar de não ter havido chuvas tão intensas. Dessa forma, observa-se que não só a quantidade de chuva, mas sua época em relação ao início do período chuvoso e a cota do reservatório também influenciam na concentração de sedimentos.

Esse fenômeno é esperado, uma vez que reservatórios menores devem ser mais influenciados por fatores externos do que reservatórios de maior área e volume. Isto é, em reservatórios menores eventos externos de reduzida magnitude devem proporcionar maiores alterações nas características físicas, químicas e biológicas da massa d'água do que esse mesmo evento atuando em reservatórios maiores (THORTON et al., 1990).

A alta influência da pluviometria na CSS no reservatório do Descoberto também pode ser explicada pelo alto Índice de Circularidade - IC da BHAD, aproximadamente 0,6. Quanto mais próximo de 1,0 o IC, mais circular é a bacia. Quanto mais circular é a bacia, mais rápido os efeitos de uma chuva são percebidos no exutório da bacia (LIMA, 2008; FREVERT et al. 1963).

O tamanho reduzido do reservatório do Descoberto e o formato da BHAD explicam a alta relação da pluviometria e CSS. Quanto menor a cota desse reservatório maior a influência das chuvas no aporte de sedimentos.

#### 5.4 – ANÁLISE ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM BASE NOS DADOS LANDSAT-8.

Para obter o modelo de estimativa de CSS com os dados Landsat – 8, primeiramente realizou-se a correlação entre as concentrações obtidas em campo as bandas simuladas do vermelho (figura 33a) e NIR (33b) desse sensor.

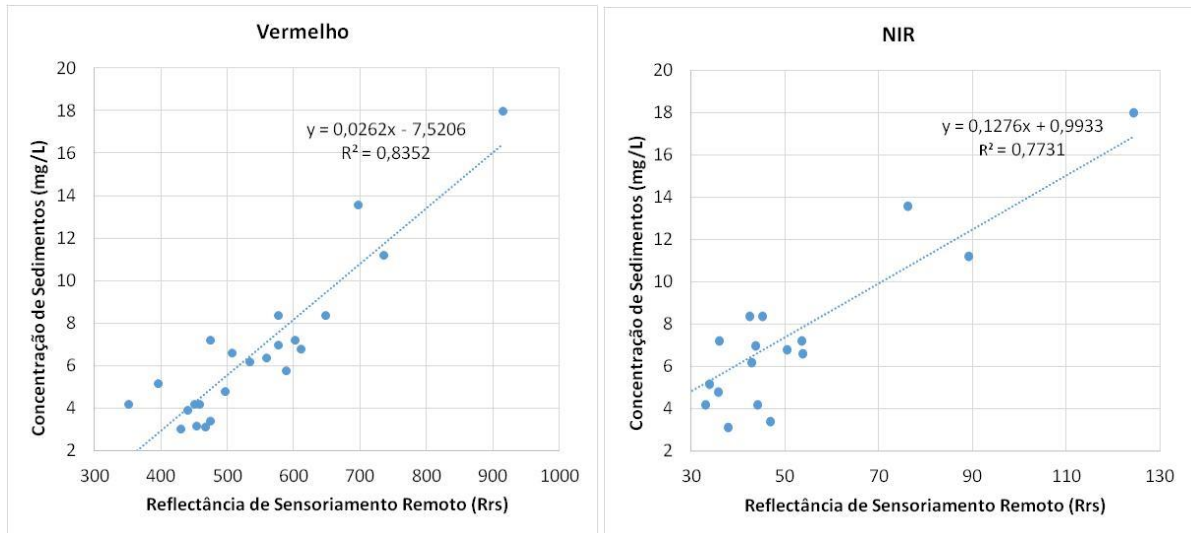


FIGURA 33. Correlação da Rrs das bandas simuladas do vermelho (33a) e NIR (33b) do sensor Landsat - 8 com as CSS medidas em campo.

Os valores de  $R^2$  foram 0,8352 e 0,7731 para as bandas simuladas do vermelho e NIR do Landsat – 8, respectivamente. A função linear foi a que melhor representou a correlação.

Isso indica que para o Landsat - 8 a banda que melhor explicaria a concentração de sedimentos é a banda 4 (vermelho). Entretanto, como os Coeficientes de Determinação são muito próximos para as duas bandas (B4 – vermelho e B5 – NIR), as equações 17 e 18 foram testadas para estimar a concentração de sedimentos a partir dos dados Landsat-8.

$$CSS = 0,0262 * B4 - 7,5206 \quad (17)$$

$$CSS = 0,1276 * B5 + 0,9933 \quad (18), \text{ onde:}$$

CSS é a concentração de sedimentos em suspensão em mg/L, B4 é o valor de reflectância da banda 4 do sensor Landsat-8 e B5 é o valor de reflectância da banda 5 desse sensor.

Para verificação de qual dos modelos melhor estima a concentração de sedimentos, aplicou-se as equações 17 e 18 às imagens das datas 15/3/2016 e 9/10/2016, datas das duas primeiras coletas de campo. As figuras 34 e 35 apresentam a distribuição espacial das concentrações de sedimentos a partir dos dados simulados do Landsat-8 para essas 2 datas.

Ressalta-se que a coleta de campo de 28/4/2017 não foi utilizada por não ser dia de passagem do satélite Landsat 8, e sim do satélite Sentinel 2. As áreas em branco na figura 34 são valores “no data” em função da presença de nuvens, retiradas pela aplicação da *CFMask*.



Já as áreas em branco no interior do reservatório na figura 35 são áreas onde não ocorreram pixels puros de água, dado o baixo nível do reservatório.

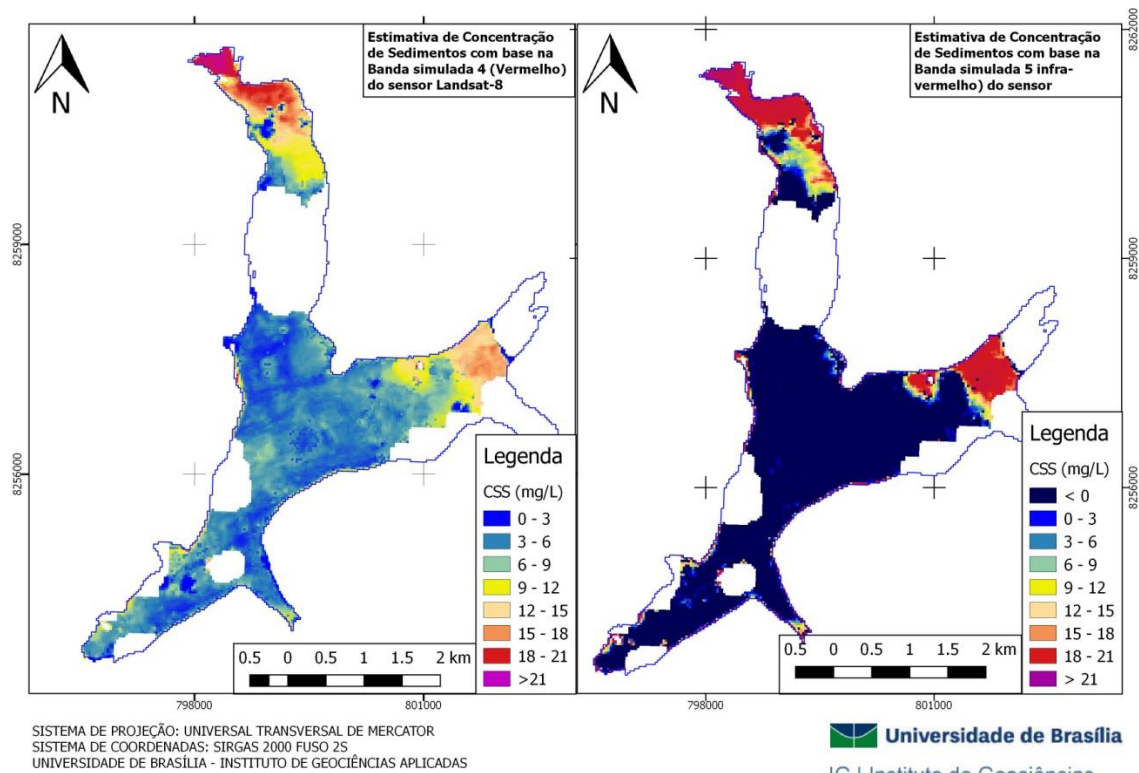


FIGURA. 34. Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto em 15/3/2016, com base nas bandas simuladas do vermelho (30a) e NIR (30b) do sensor Landsat-8.

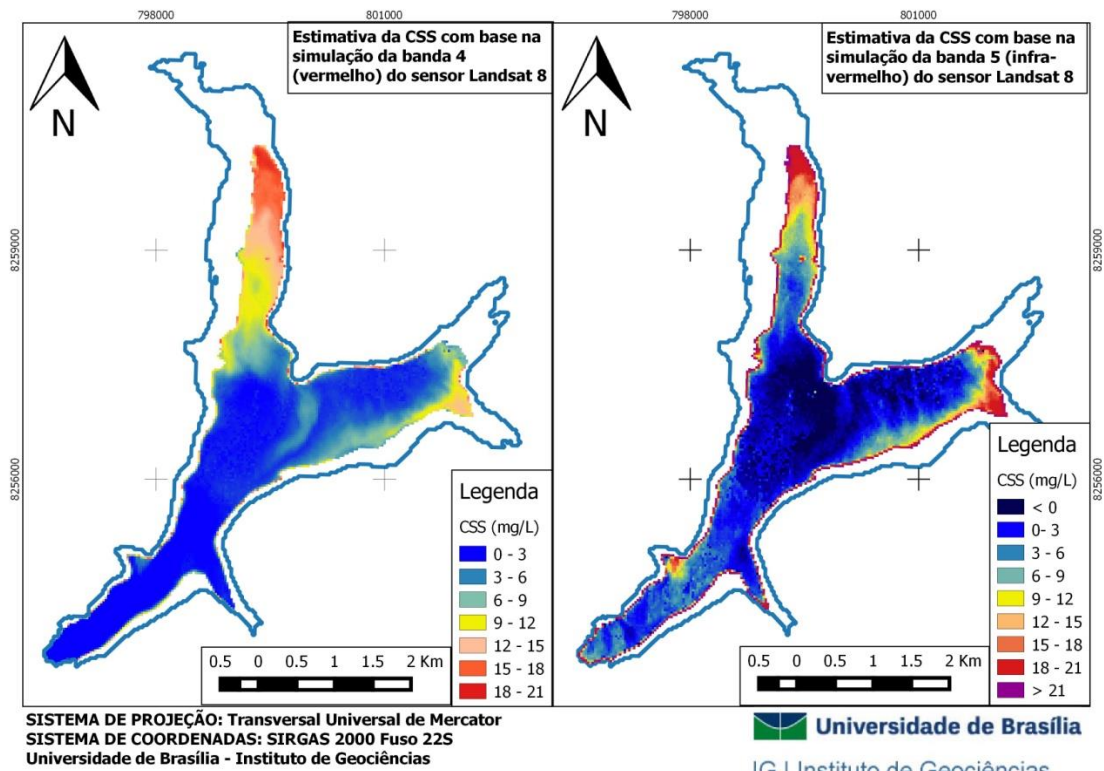


FIGURA. 35. Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto em 9/10/2016, com base nas bandas simuladas do Vermelho (31a) e NIR (31b) do sensor Landsat-8.

Apesar da alta correlação dos valores de reflectância *in situ* com as concentrações de sedimentos, apenas o modelo proposto pela equação 17 demonstrou ser um bom estimador de CSS. As concentrações estimadas pela banda simulada do NIR apresentaram um intervalo muito grande de valores, incluindo concentrações negativas, havendo subestimação das concentrações menores e superestimação das concentrações maiores. A banda do vermelho, no entanto, demonstrou-se bastante coerente com o verificado em campo, conseguindo captar corretamente o padrão de distribuição espacial da CSS ao longo do reservatório.

Comparando-se as concentrações de sedimentos estimadas pelos modelos propostos pelas equações 17 e 18 com as medidas durante as coletadas de campo, por meio das correlações apresentadas nas figuras 36a e 36b, buscou-se verificar se os modelos estavam estimando corretamente a CCS nos pontos de controle. Para essa verificação buscou-se comparar o valor de concentração estimado no pixel mais próximo ao ponto de coleta.

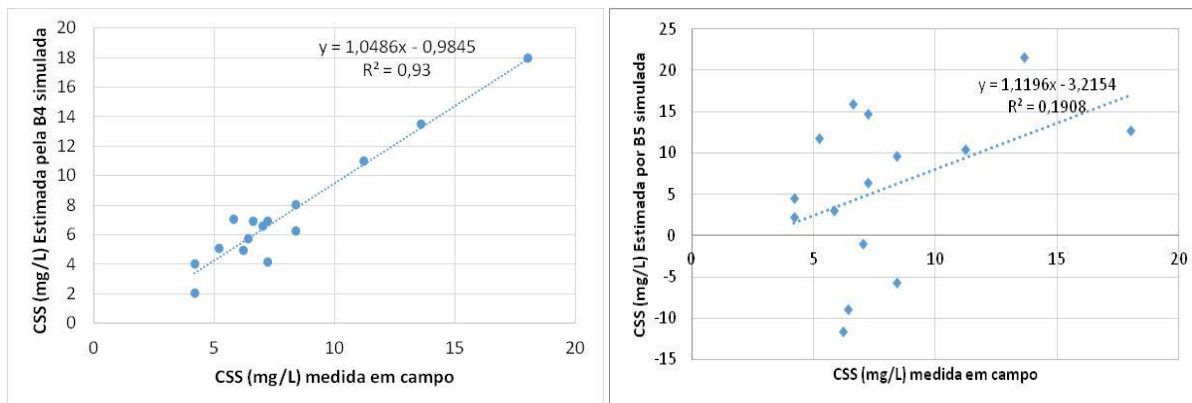


FIGURA 36. Correlação entre as CSS medidas em campo e as estimadas pelas equações 18 (34a) e 19 (34b) com base em imagens Landsat 8 nas mesmas datas e locais das coletas de campo.

Observa-se que a banda 4 simulada consegue detectar corretamente a variação da CSS ao longo do reservatório, apresentando alta precisão dada a grande similaridade entre os dados estimados e efetivamente medidos, conforme indica o valor de  $R^2 = 0,93$ . A raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (RMSE%) para o modelo baseado em B4 foi de 15,12%.

Já a banda 5 simulada não foi capaz de estimar corretamente a CSS. A baixa correlação entre os valores estimados e os efetivamente medidos, bem como a presença de concentrações negativas e concentrações muito acima do esperado demonstram que o modelo proposto pela equação 18 não é adequado para estimação de CSS. A RMSE% para esse modelo foi de 107,79%.

Diante desses resultados, buscou-se comparar as reflectâncias das bandas simuladas com as reflectâncias efetivamente medidas pelas bandas verdadeiras do sensor nos mesmos pontos de coleta para as mesmas datas, conforme apresentado na figura 37. Para essa

comparação utilizou-se o valor de reflectância do pixel mais próximo ao ponto medido pelo espectrorradiômetro.

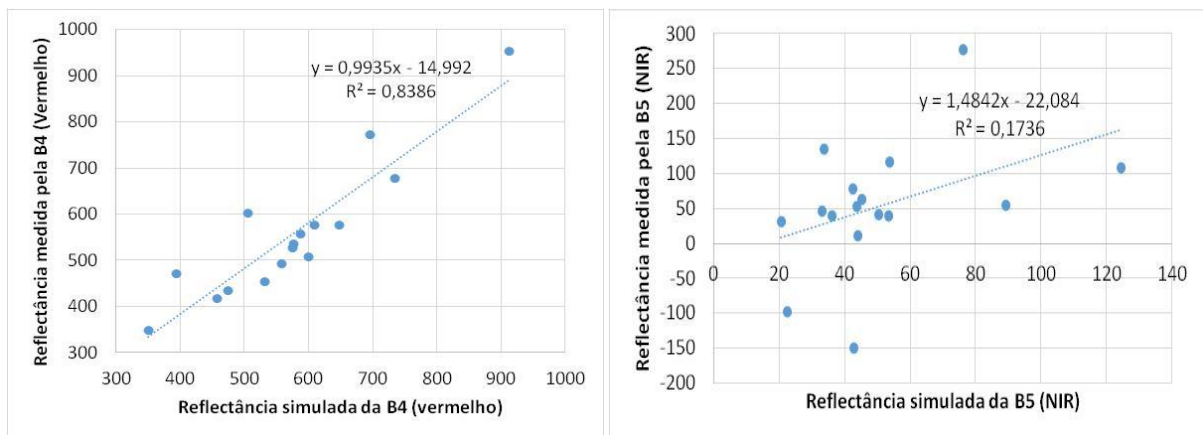


FIGURA. 37. Correlação entre as bandas simuladas e reais do vermelho (37a) e NIR (37b) do Landsat 8.

Observa-se que há uma alta correlação entre a banda simulada do vermelho e a banda real, entretanto a banda real apresenta valores de reflectância levemente superiores. Esse fato pode ser explicado pelas interferências atmosféricas, que tendem a elevar as reflectâncias de maneira geral em uma imagem e que são mais intensas em águas na banda do NIR.

A baixa correlação entre as bandas simuladas e reais do NIR também foi observada por outros autores. Olivietti et al., (2016) e Dekker et al., (2002), que afirmam que a banda NIR do Landsat é mais sensível a efeitos atmosféricos e, portanto, a calibração atmosférica é menos acurada.

Os valores negativos de CSS encontrados pela equação 18 ocorrem em decorrência da existência de pixels com valores de reflectância também negativos, o que denota inconsistência na correção atmosférica. Observa-se que o modelo de correção atmosférica 6SV não é bem ajustado para água na banda do NIR. O sensor OLI foi construído principalmente para estudos de cobertura da terra sendo a banda do infravermelho fundamental para os estudos de vegetação (GERACE et al., 2013). O modelo 6SV é ajustado para representar corretamente as altas reflectâncias da banda no NIR, correspondentes a alvos de vegetação (VERMOTE et al., 2016), em detrimento das baixas reflectâncias das águas. Em razão disso, descartou-se a banda NIR do Landsat para estimativa de CSS.

Dada a alta correlação entre as bandas simulada e real do vermelho, buscou-se a correlação direta entre as CSS medidas em campo e as reflectâncias da banda real do vermelho do Landsat – 8. A figura 38 apresenta a correlação direta entre a reflectância da banda do vermelho do Landsat – 8 e a CSS medida em campo nas mesmas datas de passagem do satélite e nos mesmos locais.

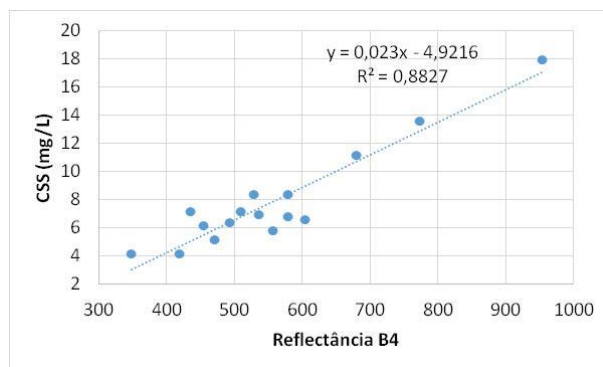


FIGURA 38. Correlação direta entre a CSS medida em campo e a Reflectância na B4 (vermelho) do Landsat 8 nas mesmas datas e passagem dos satélites e nos mesmos locais das coletas de campo.

O valor de  $R^2$  foi de 0,8827, muito próximo ao obtido com a banda simulada, assim como a equação gerada. A função linear foi a que melhor representou a correlação. Para validação desse modelo, a equação 19, gerada por essa correlação, foi aplicada às imagens do dia 15/3/2016 e 9/10/2016 e os valores de CSS estimados foram comparados com os valores medidos em campo.

$$CSS = 0,023 * B4 - 4,9216 \quad (19), \text{ onde:}$$

CSS é a concentração de sedimentos em suspensão em mg/L, B4 é o valor de reflectância da banda 4 do sensor Landsat-8.

A figura 39 apresenta a distribuição espacial das CSS a partir dos dados de reflectância da banda 4 do Landsat 8 para essas 2 datas, a partir do modelo proposto pela equação 20.

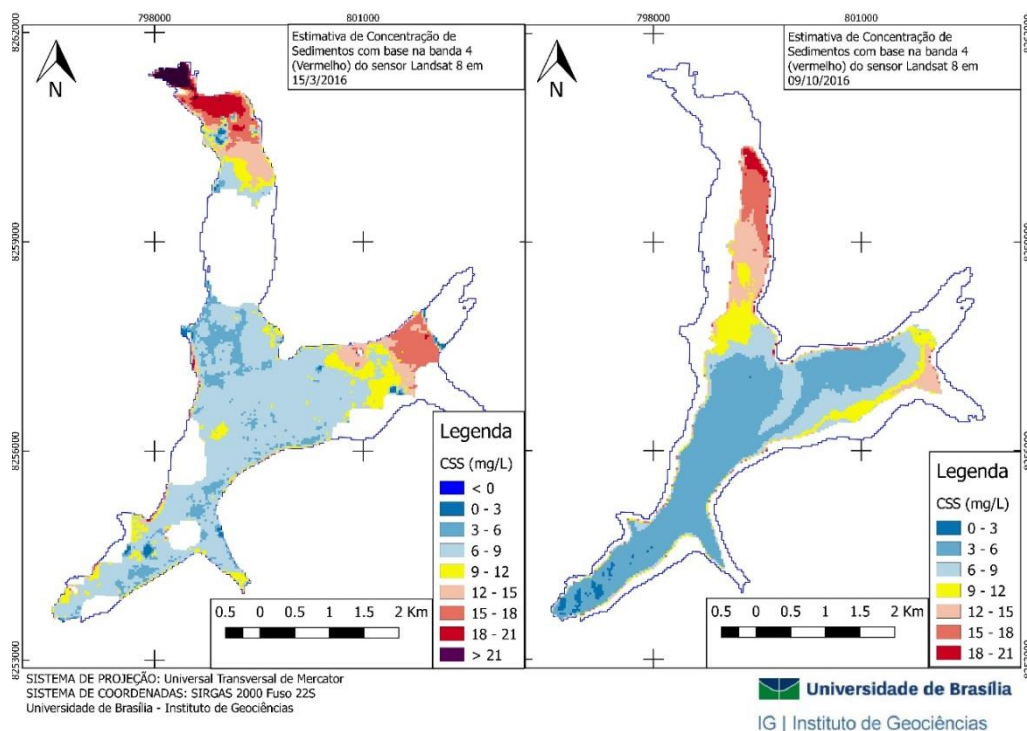


FIGURA. 39. Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda do Vermelho do sensor Landsat-8 em 15/3/2016 (39a) e 9/10/2016 (39b).

A figura 40 apresenta a correlação entre a CSS estimada pelo modelo da equação 19 e a CSS medida em campo para os mesmos pontos e nos mesmos dias de passagem do sensor. Observa-se um ajuste adequado dos valores estimados em 13 dos 16 pontos amostrados. A ocorrência de três pontos discrepantes, com concentrações estimadas significativamente maiores que as medidas, estão localizados nas regiões mais próximas às regiões de entrada dos três principais afluentes do reservatório, onde o assoreamento é mais acentuado e a profundidade do reservatório é menor. Dessa forma, é possível que o sensor tenha captado o fundo do reservatório nessas regiões fazendo com que a reflectância do vermelho se elevasse, causando a superestimação da CSS nesses pontos. Esse fenômeno também pode ser corroborado pelo efeito de borda observado nas máscaras de pixels puros de água obtidas pelo *CFmask*. Entende-se que, apesar de serem pixels puros de água, como estão muito próximos à margem, o sensor capta o fundo do reservatório, fazendo com que a reflectância do vermelho aumente em função da influência das características espectrais do fundo.

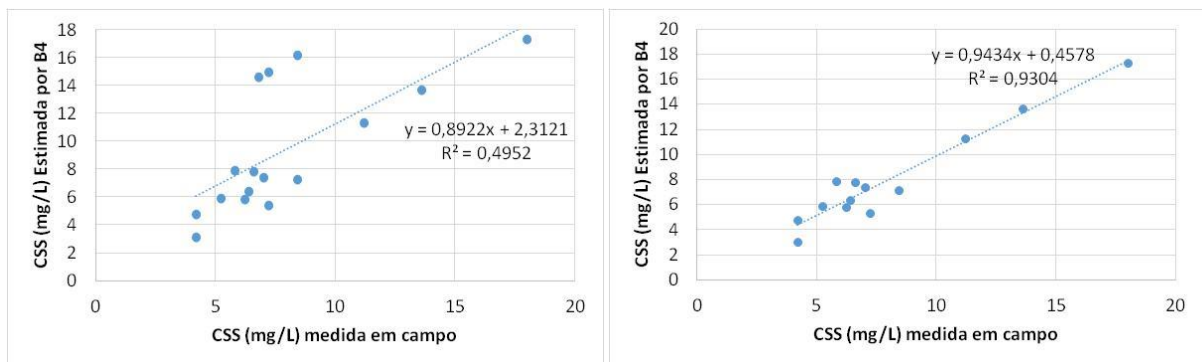


FIGURA 40. Correlação entre a CSS medida em campo e a estimada pela banda 4 do sensor Landsat 8, considerando todos os pontos (40a) e considerando os 13 pontos mais representativos (40b).

Além disso, esses três pontos foram estimados com base na imagem de 15/3/2016, que apresentou grande quantidade de nuvens e aerossóis. Nesse caso o algoritmo de correção atmosférica 6SV não foi capaz de retirar completamente os efeitos atmosféricos, fato que também pode ter contribuído para um aumento nos valores de reflectância.

Desconsiderando-se os três pontos discrepantes, observa-se um alto ajuste entre os valores estimados e os medidos (figura 40b) com base no modelo proposto pela equação 19, com  $R^2$  de 0,9304 e RMSE% de 11,83%. Entretanto, se forem considerados todos os pontos o RMSE% eleva-se para 37,34%. A tabela 10 apresenta o  $R^2$  e o RMSE% das três equações testadas neste trabalho: a partir da correlação com B4 simulada (equação 18); a partir da correlação com B5 simulada; e a partir da correlação direta com B4.

Tabela 10. Coeficiente de Determinação e Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual das equações de estimativas de CSS aplicadas para as bandas 4 e 5 do sensor Landsat 8.

	<b>B4 Simulada</b>	<b>B4 Direta</b>	<b>B5 Simulada</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0,8352	0,8827	0,7731
<b>RMSE%</b>	15,12%	37,34%	107,79%

Os modelos propostos pelas equações 17 e 19 permitem concluir que a banda 4 do Landsat – 8 estima adequadamente a CSS, apresentando valores significativamente próximos e as variações encontradas pelas medidas também foram verificadas nas estimativas, denotando ótima capacidade do sensor em detectar variações de concentrações de sedimentos, mesmo em águas com baixas concentrações.

Observa-se que, tanto a correlação por meio de radiometria de campo e simulação de bandas quanto pela correlação direta entre as reflectâncias de sensoriamento remoto no vermelho e as concentrações são formas adequadas de se estimar com precisão a CSS a partir de dados Landsat 8. Essa constatação é corroborada pela alta correlação entre a radiometria de campo e a reflectância de sensoriamento remoto na faixa do vermelho (figura 37a), denotando uma ótima correção atmosférica do sensor nessa faixa do espectro eletromagnético.

A única ressalva a ser feita quanto ao uso da correlação direta é em relação ao nível do reservatório. Regiões muito rasas podem apresentar CSS superestimadas. Portanto, para se utilizar a correlação direta entre reflectância e CSS recomenda-se conhecer a cota ou a batimetria do reservatório ou curso d'água para evitar superestimativas. Em razão disso o modelo selecionado para estimativa de CSS a partir dos dados Landsat 8 foi o proposto pela equação 17.

Validado o modelo, é possível aplicá-lo para toda coletânea de imagens Landsat 8. Como as imagens do Landsat 8 somente foram disponibilizadas a partir de 2013, foram obtidas 82 imagens entre 24/4/2013 e 28/12/2016, das quais foram selecionadas 24 em razão, principalmente, da qualidade atmosférica, presença de nuvens, aerossóis e neblina. A partir da análise dessas imagens é possível analisar o comportamento espacial da concentração de sedimentos ao longo do tempo. A Figura 41 apresenta a evolução do comportamento espacial de CSS no reservatório do Descoberto em diferentes datas.

A partir da análise das imagens, nota-se que o braço que recebe maior carga de sedimentos ao longo do ano é o rio Descoberto, também sendo o que sofre maior variação de CSS. Já os que recebem menores cargas são os córregos Rocinha e Queimado. Na parte próxima à barragem, onde se realiza o bombeamento de água para abastecimento, a concentração de sedimentos mantém-se praticamente estável ao longo do ano, comportamento

semelhante também é verificado na porção central do reservatório. O padrão de maior CSS nas zonas de entrada do reservatório, diminuindo à medida que se aproxima do exutório, é típico de reservatórios e grandes rios, sendo encontrado por Menezes (2013), Olivietti et al., (2016), Villar et al., (2012), Santini et al., (2014).

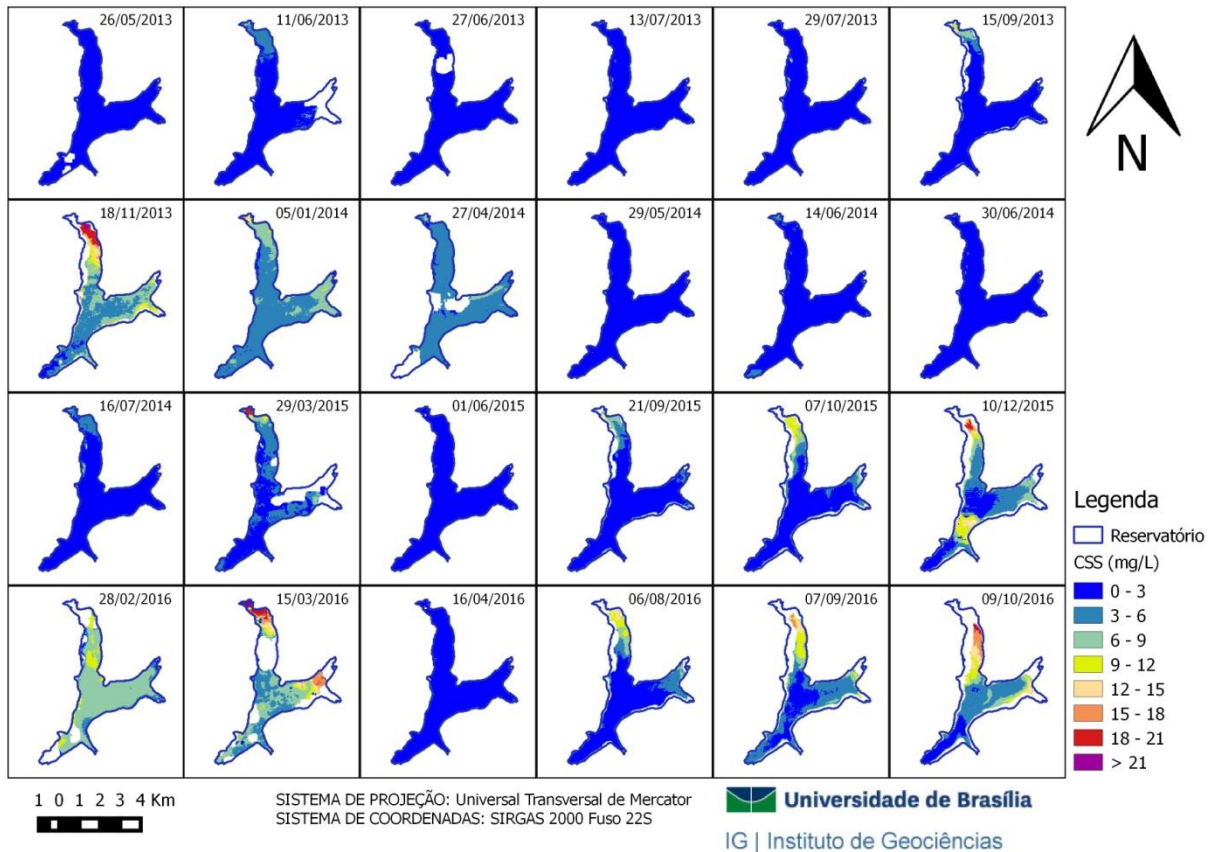


FIGURA 41. Comportamento espacial as CSS entre maio de 2013 e outubro de 2016 a partir de dados Landsat 8.

A figura 41 também permite a análise espaço-temporal do reservatório do Descoberto. Observa-se um lago bastante homogêneo e com concentrações muito baixas de sedimento nos meses de estiagem (maio a setembro). Nas imagens do período chuvoso o lago apresenta-se mais heterogêneo, tendo maiores concentrações nas zonas de entrada diminuindo em direção à barragem. Na medida em que o reservatório vai se enchendo, no final do período chuvoso, a CSS vai diminuindo e o lago se homogeneizando novamente.

## 5.5 – ANÁLISE ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM BASE NOS DADOS SENTINEL 2.

Como o sensor Sentinel 2 possui 6 bandas com potencial de estimativa de CSS, realizou-se a correlação entre as CSS obtidas em campo e a reflectância nos centro das bandas 4 (vermelho), 5 (red edge 1), 6 (red edge 2), 7 (red edge 3), 8 (NIR) e 8A (NIR). As correlações são apresentadas na figura 42.

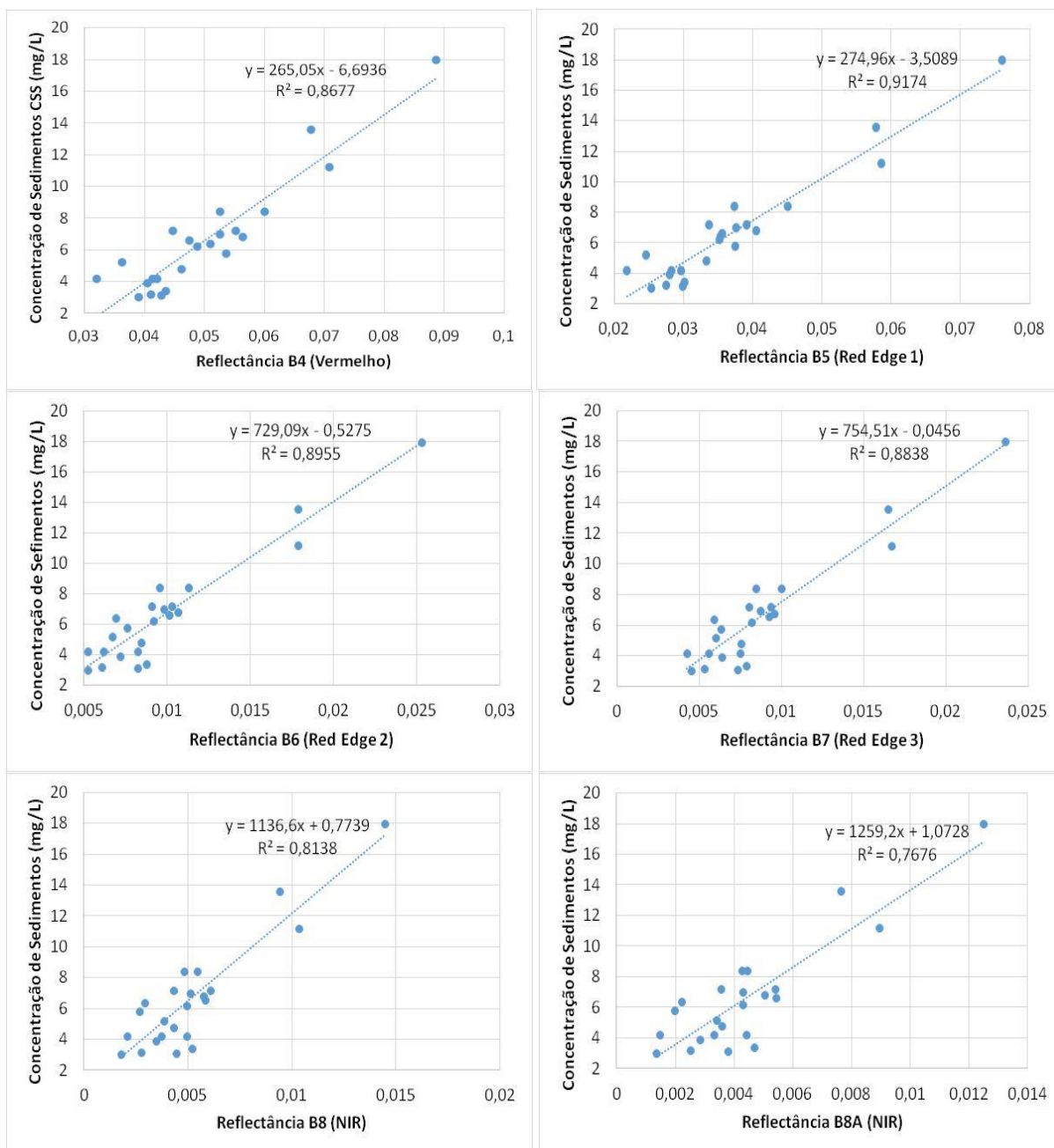


FIGURA 42. Correlação da Rrs dos centros das bandas 4, vermelho (42a); 5, red edge 1 (42b); 6, red edge 2 (42c); 7 red edge 3 (42d); 8, infravermelho (42e); e 8A, infravermelho (42f) do sensor Sentinel 2 com as CSS medidas em campo.

Os valores de  $R^2$  variaram de 0,7676 (B8A) até 0,9174 (B5). A função linear foi a que melhor representou a correlação.

Isso indica que para o Sentinel 2 a banda que melhor explicaria a concentração de sedimentos é a banda 5 (red edge 1). Entretanto, como os  $R^2$  são muito próximos para todas as bandas, as seis foram testadas para estimar a CSS a partir dos dados Sentinel 2.

Para a verificação de qual modelo melhor estima a CSS, bem como qual tipo de correção atmosférica é mais adequada para essa análise, aplicou-se as seis equações



apresentadas na figura 42 às suas respectivas bandas após a realização dos quatro tipos de correção atmosférica realizados, descritos no item 4.3.3.

As figuras 43 a 48 apresentam a distribuição espacial da CCS estimadas a partir da imagem Sentinel 2 do dia 28/4/2017, data de coleta de campo, nas bandas 4, 5, 6, 7, 8 e 8A, respectivamente, corrigidas para reflectância de superfície a partir dos quatro diferentes métodos testados nesse trabalho. As áreas em branco nas figuras são valores “no data” em função da presença de nuvens, retiradas pela aplicação máscara de pixels puros de água. A Correção Atmosférica *Sen2cor* não foi capaz de gerar a banda 8 (NIR) de reflectância de superfície, razão pela qual essa não aparece na figura 48.

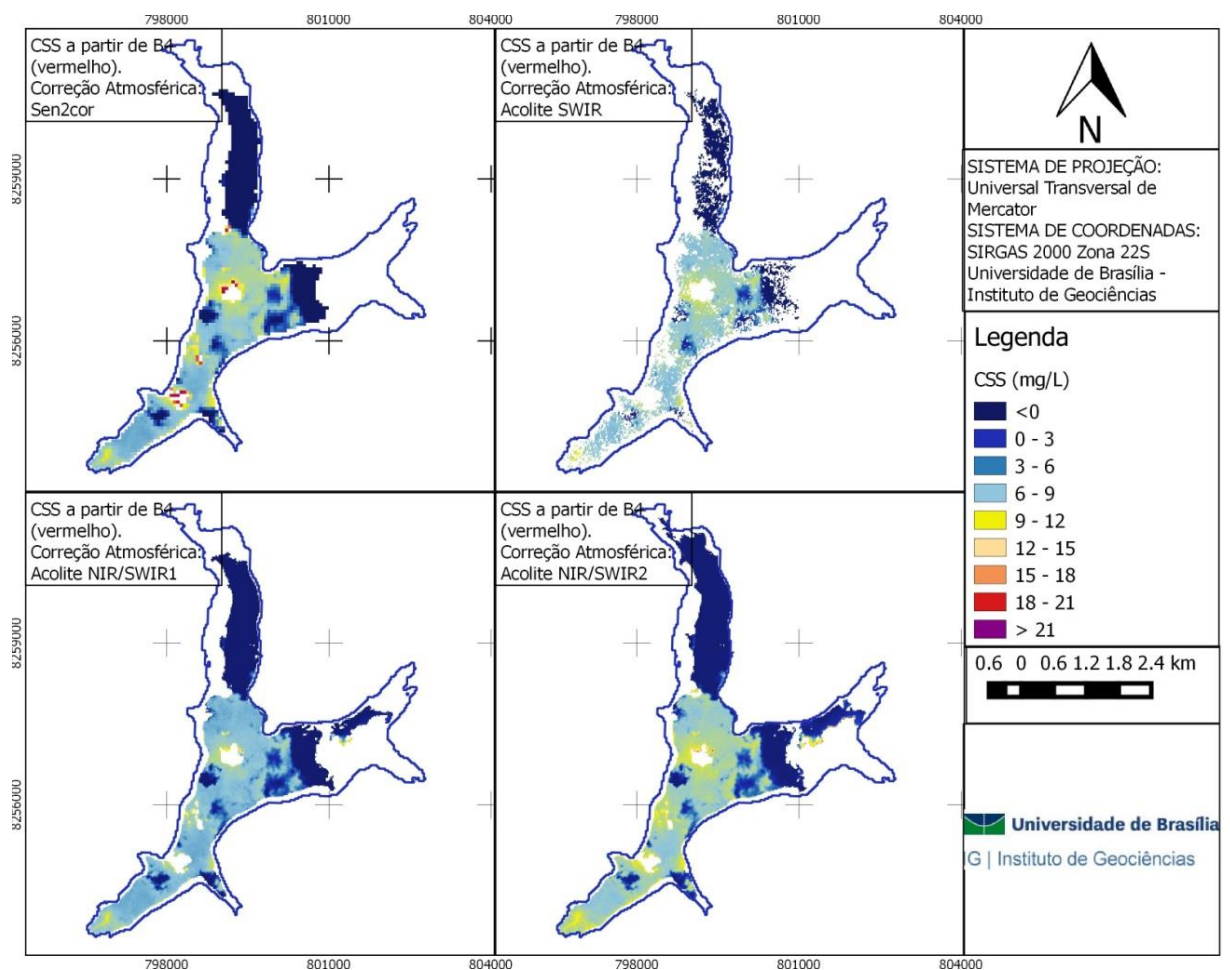


FIGURA 43. Distribuição espacial da CCS no reservatório do Descoberto, com base na banda 4 (vermelho) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.

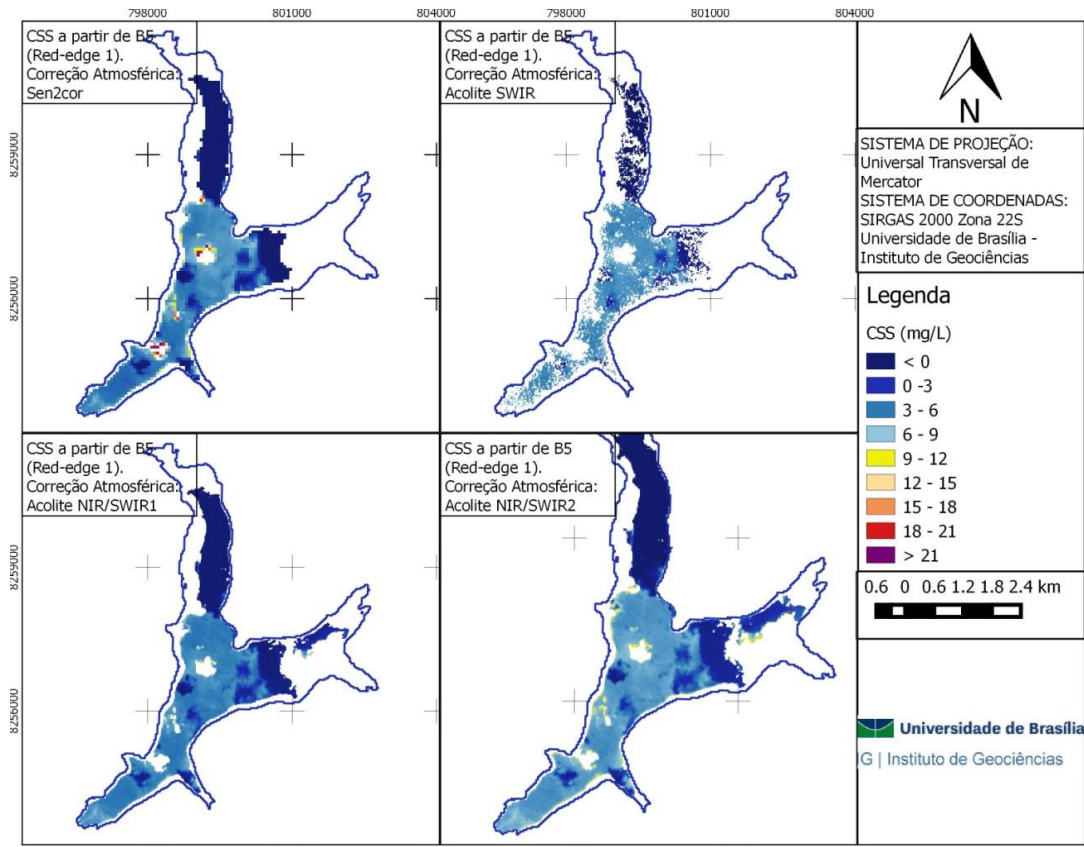


FIGURA 44. Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 5 (red edge 1) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.

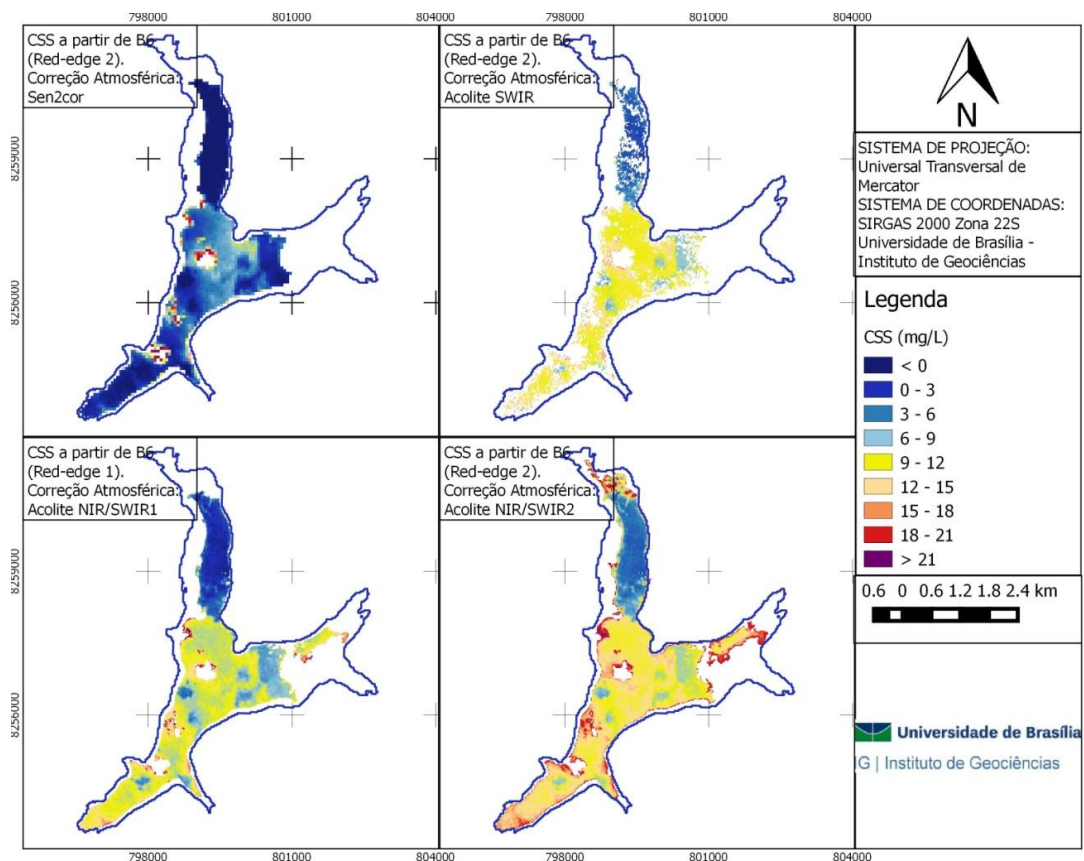


FIGURA 45. Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 6 (red edge 2) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.

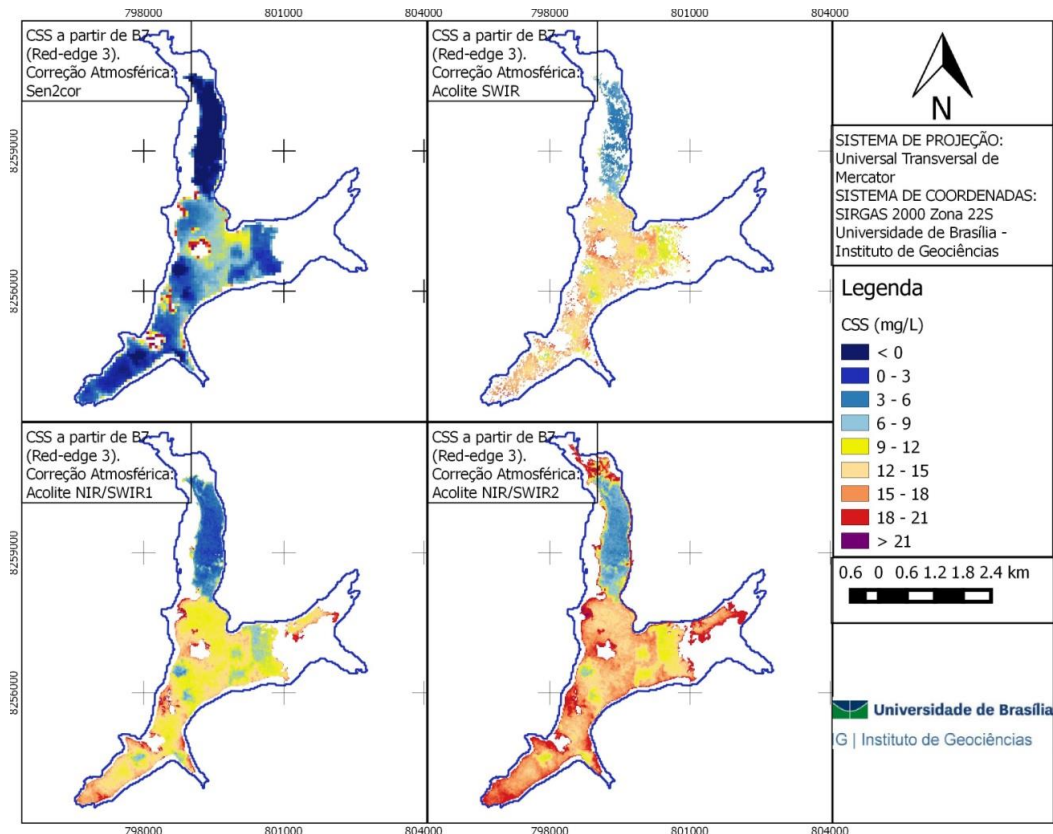


FIGURA 46. Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 7 (red edge 3) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.

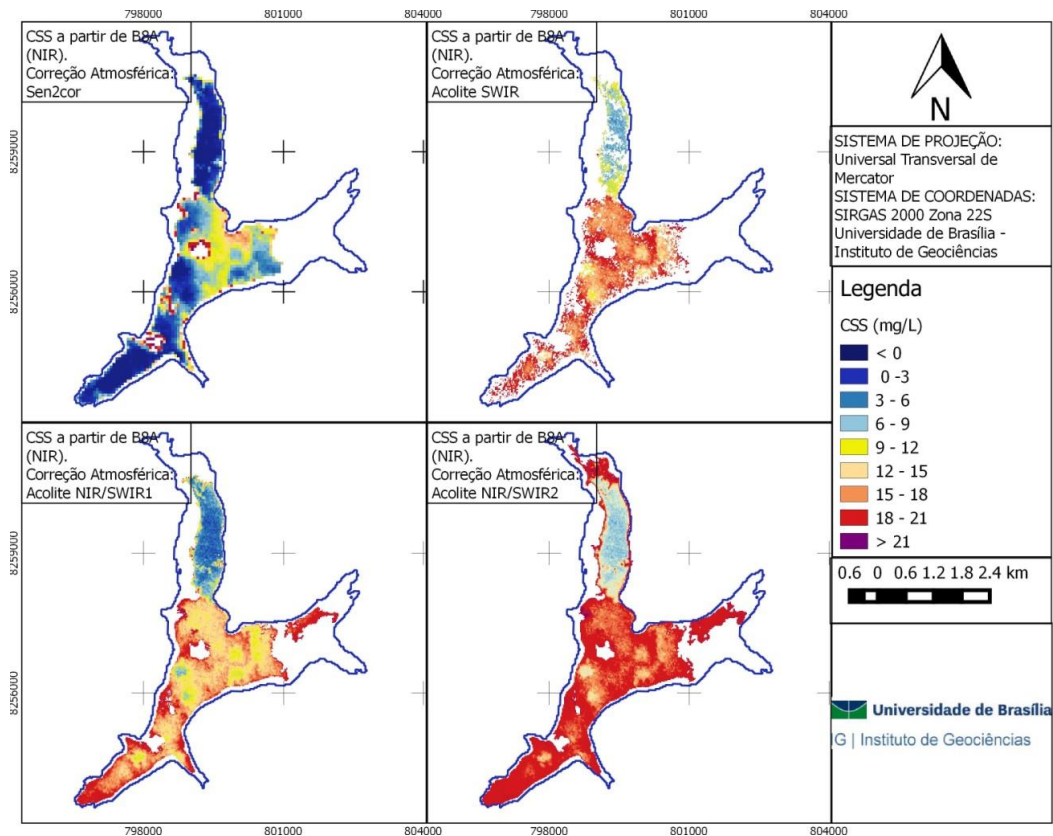


FIGURA 47. Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 8A (NIR) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 4 correções atmosféricas diferentes.

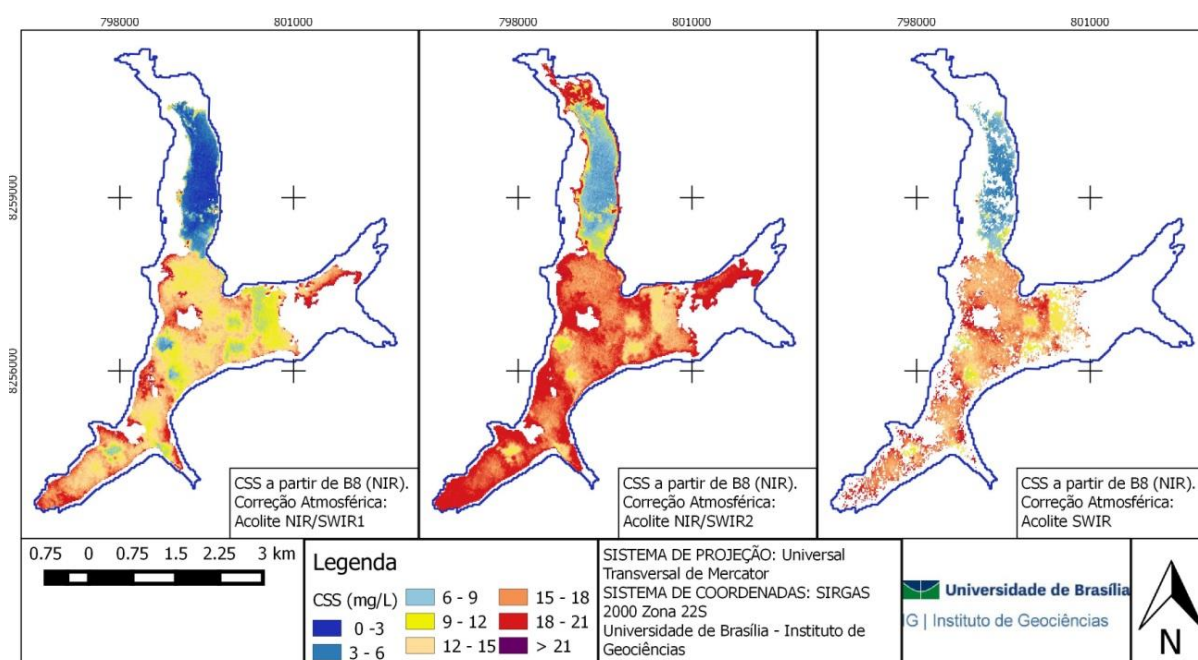


FIGURA 48. Distribuição espacial da CSS no reservatório do Descoberto, com base na banda 8 (NIR) do sensor Sentinel 2 em 28/4/2017 a partir de 3 correções atmosféricas diferentes.

Para a verificação da melhor equação, foram comparados os valores de CSS medidos em campo e os valores estimados para cada equação e suas respectivas correções atmosféricas, bem como seus respectivos RMSE%. Para essa verificação buscou-se comparar o valor de concentração estimado no pixel mais próximo ao ponto de coleta. A tabela 11 apresenta os RMSE% das 6 equações testadas, uma para cada banda, e suas respectivas correções atmosféricas

Tabela 11. Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual das equações de estimativas de CSS aplicadas para as seis bandas do sensor Sentinel 2 testadas com diferentes métodos de correção atmosféricas

Correção Atmosférica / Banda	RMSE%					
	B4	B5	B6	B7	B8	B8A
<b>Sen2cor</b>	115,28	85,89	63,32	96,02		112,28
<b>Acolite NIR/SWIR 1</b>	97,07	75,57	255,76	302,77	405,43	416,14
<b>Acolite NIR/SWIR 2</b>	102,11	96,51	313,93	382,99	456,91	527,08
<b>Acolite SWIR</b>	134,11	116,28	313,69	369,71	433,82	432,26
<b>RMES % Médio</b>	112,24	93,56	236,67	287,87	432,05	371,94

A partir dos resultados obtidos, observa-se que os métodos de correção atmosférica testados não foram capazes de retornar valores de reflectância de superfície coerentes com os obtidos *in situ*. Os quatro métodos testados retornaram áreas de sombra de nuvens como pixels puros de água, em especial na região do braço do rio Descoberto (ponto 5). Martins et al. (2017) também relataram dificuldade na remoção dos efeitos atmosféricos sobre superfícies de baixa reflectância como reservatórios.

De maneira geral a correção atmosférica gerada pelo Sen2cor é mais acurada do que as correções geradas pelo Acolite. Fato que também foi constatado por Martins et al., (2017).

A partir da banda 6, observa-se um aumento da superestimação da CSS à medida que se desloca do vermelho para o NIR. Martins et al., (2017) defendem que o RMSE% máximo a ser aceito na estimativa de parâmetros de qualidade da água a partir de sensoriamento remoto seja 100%. No caso específico desse trabalho a banda que mais se aproximou da realidade de campo foi B6 a partir da correção Sen2cor. Porém, se forem consideradas as 4 correções testadas, a banda que apresenta o maior potencial para a estimativa de CSS é B5, uma vez que possui menor RMSE% médio.

Analisando-se o comportamento espectral dos sedimentos em suspensão no reservatório do Descoberto em comparação com o a posição e largura das bandas do Sentinel 2, apresenta-se na figura 49, observa-se que as regiões do espectro eletromagnético com maior variação de reflectância são as bandas 4 e 5.

Entretanto a banda 4 possui o dobro da largura da banda 5 (30nm e 15nm respectivamente). Observa-se a formação de uma ombreira justamente na região da banda 4, que se acentua à medida que a CSS aumenta. Como não se conhece as funções de ganho de banda do Sentinel 2, o uso do valor de reflectância do centro da banda ignora o comportamento espectral do sedimento dentro dessa faixa. Essa generalização pode propagar erros na estimativa de CSS na banda 4. Já na banda 5 esse efeito é minimizado em razão de essa ser mais estreita e o comportamento espectral dos sedimentos em suspensão nessa faixa serem lineares.

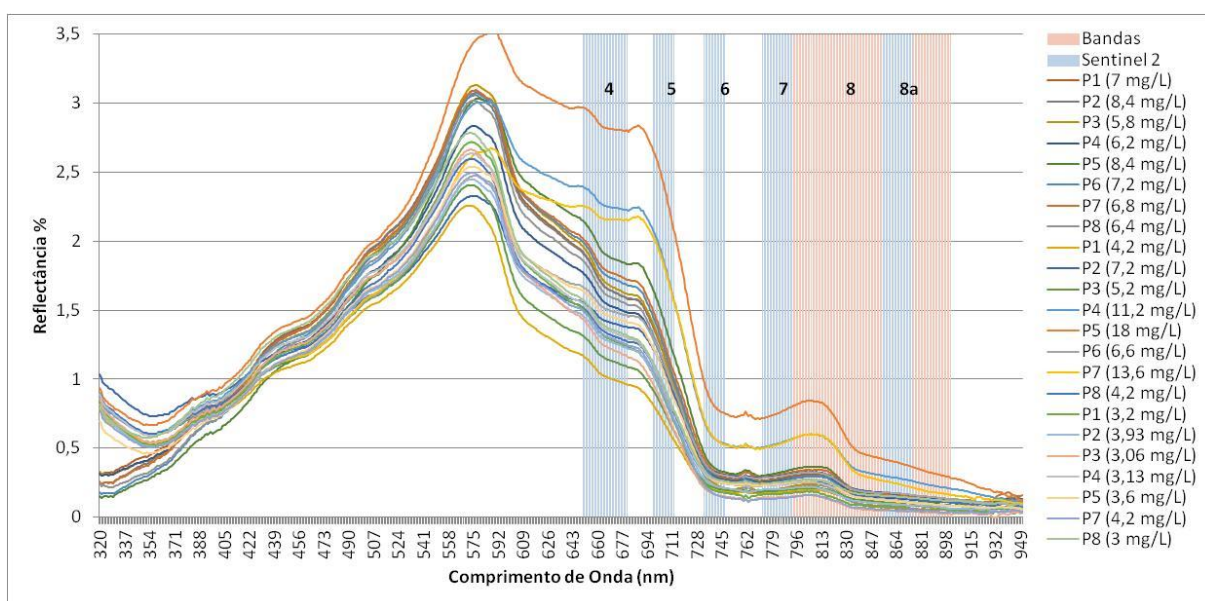


FIGURA 49. Comportamento espectral dos sedimentos em suspensão no reservatório do Descoberto em relação às bandas espectrais do vermelho ao NIR sensor Sentinel 2.

Essa análise reforça conclusão de que a banda 5 do Sentinel 2 possui o maior potencial de estimativa de CSS para o reservatório do Descoberto.

## 5.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E A EVOLUÇÃO DO USO DO SOLO NA BACIA

A partir da série temporal de CSS gerada pelo MODIS foi observada tendência de um leve aporte de sedimentos ao longo dos 16 anos da série histórica analisada, sendo verificado um aumento de aproximadamente 1,3 mg/L na CSS média anual ao longo do período analisado, ou seja, um incremento anual de aproximadamente 0,08 mg/L. Entretanto esse incremento não ocorre regularmente ao longo dos anos. Existe grande variação da concentração média anual de sedimentos em suspensão no reservatório da série histórica analisada neste trabalho. A Figura 50 apresenta a variação da CSS média anual entre 200 e 2016, a partir dos dados MODIS, e a pluviometria anual do período (equação 16).

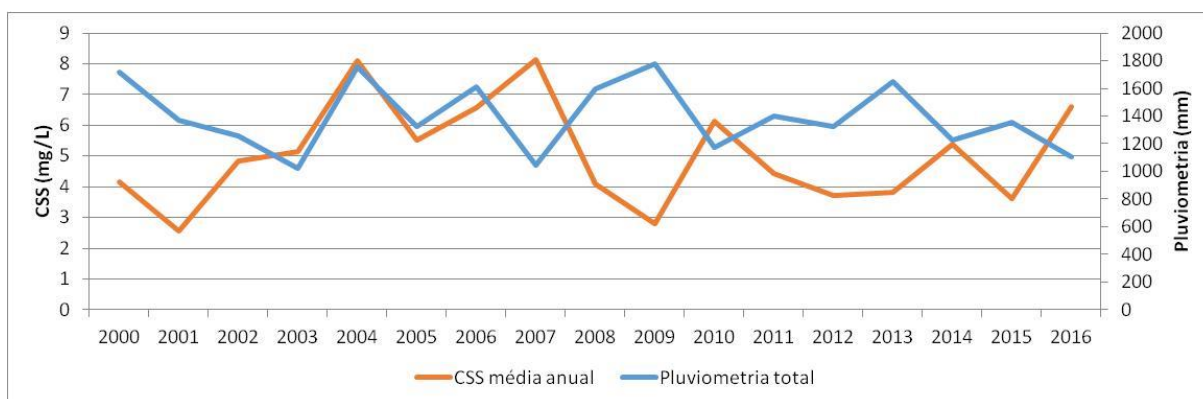


FIGURA 50. Variação da Concentração de Sedimentos e Suspensão média anual e da pluviometria total anual entre 2000 e 2016 no reservatório do Descoberto.

Fonte de dados: ANA (2017)

Também é possível observar uma tendência sutil de diminuição de precipitações na BHAD ao longo dessa série. Um dos fatores que pode explicar a tendência de aumento da CSS a despeito da tendência de diminuição das precipitações é o aumento da variação da cota do reservatório verificada nos últimos anos, causando maior revolvimento do fundo do reservatório, suspendendo sedimentos.

A figura 51 apresenta a variação do nível do reservatório entre 2000 e 2017. Observa-se uma grande mudança no padrão de variação anual da cota do reservatório entre os primeiros anos da série histórica e os últimos. Nos anos de maior variação de cota, também se observa uma maior CSS. Essa relação é evidenciada pelas ocorrências vazante e cheia entre 2003 e 2004; 2007 e 2008; 2011 e 2012; 2013 e 2014; 2016 e 2017, quando as concentrações

ultrapassaram 20 mg/L em decorrência de variações de cotas mais acentuadas, da ordem de 3 metros.

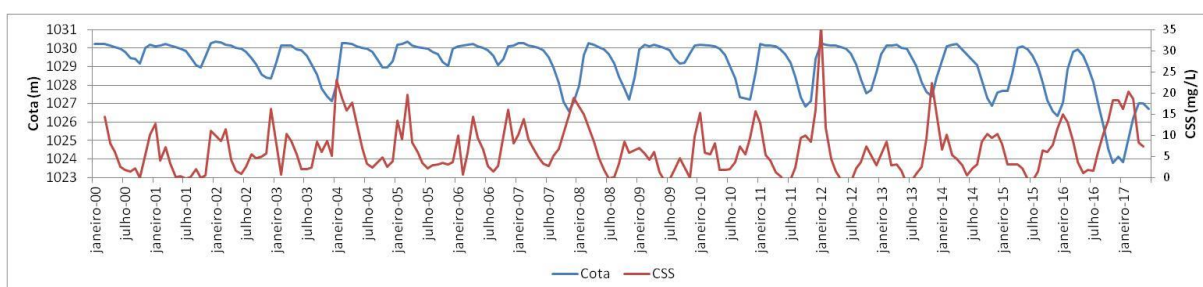


FIGURA 51. Variação da Concentração de Sedimentos em Suspensão e da cota do reservatório entre 2000 e 2017 no reservatório Descoberto.

Fonte de dados: ANA (2017)

A mudança do comportamento do reservatório pode ser relacionada com a ocupação territorial do Distrito Federal, e, especial, da BHAD. A redução das chuvas, somada à intensificação da retirada de água para abastecimento da população do DF, causaram a variação mais intensa da cota do lago nos últimos anos. A maior quantidade de solo exposto no reservatório aumenta o fenômeno de ressuspensão dos sedimentos quando da ocorrência de chuvas, aumentando a CSS.

Nunes e Roig (2015) realizaram mapeamento e a análise comparativa do uso e cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do Alto do Descoberto entre os anos 1994 e 2011 e constataram um forte aumento da área ocupada por atividades agrícolas e significativa redução da área ocupada por vegetação natural. Estudos mais recentes demonstram que a ocupação antrópica da BHAD continua avançando.

Ferrigo (2014) realizou mapeamento de uso e cobertura da terra na BHAD com base em uma ortofoto de 2013. Já Chelotti (2017) realizou semelhante trabalho utilizando uma imagem Landsat 8 de 2015. A Tabela 11 apresenta o percentual de ocupação da BHAD por áreas urbanas e solo exposto; áreas rurais e vegetação natural para os anos de 1994, 2011, 2013 e 2015, com base nos estudos citados.

Ressalta-se que, como os estudos utilizaram insumos e métodos diferentes, bem como definiram classes de uso/cobertura diferentes, os valores apresentados são uma aproximação, por meio de interpretação analógica, no intuito de demonstrar a evolução do uso do solo na bacia de forma geral.

Tabela 12. Evolução dos percentuais de ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto

Ocupação\Ano	1994	2011	2013	2015
<b>Vegetação natural</b>	65%	54%	49,64%	34,19%
<b>Área Urbana/Solo Exposto</b>	11%	13%	14,65%	13,4%
<b>Área Rural</b>	20%	28%	32,94%	49,67%

Fonte de dados: Ferrigo (2014); Nunes e Roig (2015) e Chelotti (2017)

Observa-se que em vinte anos a cobertura vegetal natural foi reduzida pela metade, sendo ocupada predominantemente por atividades rurais. A redução de vegetação em uma bacia hidrográfica intensifica os processos erosivos e aumentam o carreamento de sedimentos para os corpos hídricos (SCHIAVETTI e CAMARGO, 2002). A qualidade da água no exutório da bacia é um forte indicador da qualidade ambiental dessa. Observa-se que o aumento da CSS também pode ter relação com o aumento do aporte de sedimentos no reservatório do Descoberto em consequência do processo de ocupação da bacia.

Os braços rio Descoberto (ponto 5) e ribeirão Rodeador (ponto 6) indicados como os principais contribuintes para a carga de sedimentos ao reservatório, conforme item 5.4, são os afluentes de maior vazão, entretanto suas sub-bacias são a segunda e terceira, respectivamente, mais preservadas entre as 6 consideradas neste trabalho. Isso demonstra que, no atual nível de ocupação da bacia, a vazão ainda é mais preponderante do que o grau de degradação da sub-bacia na contribuição do aporte de sedimentos no reservatório do Descoberto.

É importante ressaltar que o uso do solo e vazão são alguns dos parâmetros que influenciam na descarga de sedimentos, mas não os únicos. Todas as características fisiográficas de uma bacia hidrográfica, tais como área de drenagem, declividade, influenciam na produção de sedimentos (BICALHO, 2006).

O aumento da CSS ao longo dos anos indica um aumento no aporte de sedimentos ao reservatório. A quantidade de sedimentos que transpõem uma barragem é insignificante em relação à quantidade de sedimentos depositados no reservatório (ZANIN et al., 2017). Com a retenção dos sedimentos pelo represamento hídrico, o volume útil do reservatório é reduzido, sendo que o assoreamento pode chegar até as tomadas d'água, inviabilizando a exploração hídrica (INFANTI JR. e FORNASARI, 1998).

Bicalho (2006), ao estudar o transporte de sedimentos no reservatório do Descoberto, apontou uma perda de 16,43% no volume útil do reservatório entre 1969 e 2002. Considerando o aumento do aporte de sedimentos no reservatório constatado neste trabalho, é possível que a redução do volume útil desse lago tenha se acentuado. No contexto atual do reservatório do Descoberto e da realidade do Distrito Federal, o agravamento da perda do seu volume útil é uma consequência desastrosa.



## 6 CONCLUSÕES

Considerando os objetivos deste trabalho, as conclusões podem ser analisadas sobre duas perspectivas: i) pelos resultados alcançados de acordo com as propostas metodológicas (perspectiva científica); ii) pelas constatações dos impactos ambientais para o abastecimento hídrico do Distrito Federal (perspectiva ambiental).

Do ponto de vista científico, pode-se destacar que:

- A CSS do reservatório do Descoberto possui um comportamento sazonal altamente relacionado ao regime de chuvas.
- Dada as características das propriedades óticas das águas do reservatório do Descoberto, a região do vermelho do espectro eletromagnético é a com maior potencial para estimativa de CSS, pois é a faixa com maior variação espectral em função da variação da CSS.
- O produto de reflectância de superfície MOD09/MYD09 é bastante eficiente para análise de sedimentos em suspensão pela sua alta correlação entre os dados do sensor e os obtidos por espectrorradiometria de campo, em especial na banda do vermelho, onde  $R^2 = 0,8105$ .
- O modelo de estimativa de CSS a partir da banda do vermelho do MODIS (equação 15) é adequado para estimativa desse parâmetro para reflectâncias variando entre 300 e 1000.
- O *Software* GETMODIS e o algoritmo MOD3R são ferramentas bastante eficazes para o monitoramento de COAs, em larga escala, pois permitem a aquisição e processamento de uma quantidade ilimitada de imagens MODIS, permitindo análises de séries temporais, comportamento sazonal e até comportamento espacial, dependendo do tamanho do reservatório.
- O produto de reflectância de superfície do Landsat 8 também é bastante eficiente para análise de sedimentos em suspensão pela sua alta correlação entre os dados do sensor e os obtidos por espectrorradiometria de campo, em especial na banda do vermelho, onde  $R^2 = 0,8352$  e  $RMSE\% = 15,12\%$ .
- Dada sua resolução espacial, o Landsat 8 permite uma análise detalhada do comportamento espacial dos sedimentos em suspensão, formação de plumas e zonas de maior aporte.
- Apesar da baixa resolução temporal do satélite Landsat-8, é possível fazer uma análise espaço-temporal adequada do reservatório do Descoberto, uma vez que em todos os anos analisados houve pelo menos uma imagem do período chuvoso.
- Os dados MODIS e Landsat 8 são complementares para o monitoramento sistemático de reservatório uma vez que o primeiro tem maiores potencialidades no monitoramento

temporal, enquanto o segundo possui maiores possibilidades no monitoramento espacial. Além disso são dados gratuitos e de fácil obtenção e manipulação.

- O produto de reflectância de superfície do Sentinel 2 é complexo de ser gerado e sua correção atmosférica apresenta correlações inferiores ao Landsat 8 e MODIS para o reservatório do descoberto, o que dificulta a estimativa de CSS a partir de dados Sentinel 2.
- O algoritmo *Sen2cor* foi mais eficiente do que o *software Acolite* na correção atmosférica dos dados Sentinel 2. A banda red edge 1 (B5) apresentou o melhor potencial para estudos de sedimentos, com  $R^2 = 0,9174$  e  $RMSE\% = 85,89\%$ .
- Em que pese o maior número de bandas ser um grande potencial, são necessários estudos mais aprofundados e melhoramentos na correção atmosférica para o uso satisfatório dos dados Sentinel 2 para o monitoramento de COAs em baixas concentrações, como no caso do reservatório do Descoberto.

Do ponto de vista ambiental, pode-se destacar que:

- Foi observado um aumento de 1,3 mg/L da CSS ao longo dos últimos 16 anos. O aumento da quantidade de sedimentos na água implica em maiores custos de tratamento da água, assoreamento e, principalmente, redução do volume útil do reservatório.
- A identificação das principais entradas de sedimentos no reservatório apontam os cursos hídricos e microbacias que merecem mais atenção do Poder Público quanto ao monitoramento e recuperação: rio Descoberto e ribeirão Rodeador.

## **7 RECOMENDAÇÕES**

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, seria interessante a integração destes resultados com dados hidrossedimentológicos dos afluentes do reservatório do Descoberto.

Durante o desenvolvimento dessa pesquisa ocorreram alguns melhoramentos desenvolvidos pela USGS no produto de reflectância de superfície do Landsat 8, em especial em 2017. Essas novas imagens não puderam ser testadas por falta de tempo hábil. Sugere-se o uso dessas imagens para trabalhos futuros com COAs em reservatórios.

As grandes dificuldades encontradas no processamento dos dados Sentinel 2 denotam a necessidade de mais estudos sobre a utilização desse sensor para a estimativa de COAs em reservatórios.

Considerando a situação atual do principal reservatório do Distrito Federal, recomenda-se ao Poder Público intensificar o monitoramento, fiscalização e também a recuperação da BHAD, em especial dos afluentes rio Descoberto e ribeirão Rodeador.

## 8 REFERÊNCIAS

AGENCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL (ADASA). Nota Técnica n.º 58/2016 – SRH/ADASA. Disponível em: [http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/3Consumidor/2AudienciasPublicas/2016/AP005-2016/NTn582016\\_simulacaoDescobertoSISGED5011.pdf](http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/3Consumidor/2AudienciasPublicas/2016/AP005-2016/NTn582016_simulacaoDescobertoSISGED5011.pdf) Acesso em 07/2/2017.

AGENCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL (ADASA). Níveis dos Reservatórios de Santa Maria e Descoberto. Disponível em: <http://www.adasa.df.gov.br/monitoramento/niveis-de-reservatorios/historico> Acesso em: 8/3/2017

AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO DISTRITO FEDERAL (TERRACAP). Mosaico de Imagens Orbitais do Distrito Federal obtido por meio do Sensores Pleiades 1A e 1B em 26/05/2016. Resolução espacial: 0,5m. 2016

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Gestor PCD – Sala de situação. Disponível em: <http://gestorpcd.ana.gov.br/Mapa.aspx> Acesso em: 1/4/2017

ALMEIDA JUNIOR, E. S. ; NASCIMENTO, D. L. ; GALVANIN, E. A. S. ; NEVES, S. M. A. S. ; JESUS, P. H. H. ; GOUVEIA, R. G. L. . Comparação dos métodos de classificação supervisionada e orientada a objeto em imagens Landsat 8 na Bacia hidrográfica Paraguai/Jauquara Mato Grosso. In: 5 Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2014, Campo Grande-MS.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Pós-processamentos Utilizando o MOD3R. Tutorial não publicado. 13p.

ANDERSON, L. O., LATORRE, M. L., SHIMABUKURO, Y. E., ARAI, E. e CARVALHO JÚNIOR, O. A. Sensor MODIS: uma abordagem geral. São José dos Campos: INPE, 2003.

BAPTISTA, G. M. M. Processamento de Dados Hiperespectrais. In MENESES, P. R. e ALMEIDA, T. (org). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília: CNPq, 2012. 266 p.

BICALHO, C. C. Estudo sobre Transporte de Sedimentos em Suspensão na Bacia do Rio Descoberto. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Publicação PTARH.DM-95/2006. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF. 123p.

BRASIL. Decreto n.º 88.940, de 7 de novembro de 1983. Dispõe sobre a criação das Áreas de Proteção Ambiental das Bacias dos Rios São Bartolomeu e Descoberto, e dá outras providências. Diário Oficial da União 9/11/1983.

BUKATA, R. P., JEROME, J. H., KONDRATYEV, K. Y., POZDNYAKOV, D. V. *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters*. CRC. NY. 1995. 362 p.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL (CAESB). Dados Hidrológicos. Não publicado.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL (CAESB).. Sistema de Gestão Hidrica. PO.SGH – 030. Rev 04. Determinação da Turbidez em Água. 6 p. 2014.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL (CAESB).. Sistema de Gestão Hidrica. PO.SGH – 049. Rev 05. Determinação de Sólidos em Água. 12 p. 2016.

CHAVEZ, P. S. 1996. *Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, [Falls Church, Va.] American Society of Photogrammetry, 62, 1025- 1036

CHELOTTI, G. B. Mapeamento de uso do solo da bacia hidrográfica do Alto Descoberto, no Distrito Federal, por meio de classificação orientada a objetos com base em imagem do satélite Landsat 8 e softwares livres. R. Bras. Geom., Curitiba, v. 5, n. 1, p. 172-185, abr/jun. 2017. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: 25/4/2017

CHEN, S., HAN, L., CHEN, X., LI, D., SUN, L., LI, Y. *Estimating wide range Total Suspended Solids concentrations from MODIS 250-m imageries: An improved method*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 99 (2015) 58–69.

CLAVERIE, M., VERMOTE, E. F., FRANCH, B., MASEK, J. G. *Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ surface reflectance products*. Remote Sensing of Environment, 169, 390–403. 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005. Publicação DOU n.º 053, de 18/03/2005, págs. 58-63.

DEKKER, A. G. *Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing*. 240 p. Thesis – University of Amsterdam, 1993.

DEKKER, A. G.; VOS, R. J.; PETERS, S. W. M. *Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data*. Int. J. Remote Sens. 2002, 23, 15–35.

DISTRITO FEDERAL. Adequação Ambiental da Reserva Biológica e das Propriedades Rurais às Margens do Lago Descoberto. 2009. 87 f. Disponível em: [http://www.descobertocoberto.df.gov.br/documentos/AdequacaoAmbiental\\_VersaoFinal.pdf](http://www.descobertocoberto.df.gov.br/documentos/AdequacaoAmbiental_VersaoFinal.pdf) Acesso em 24/9/2015.

DISTRITO FEDERAL. Chácaras irregulares que afetam a Barragem do Descoberto são retiradas. Agência Brasília. 25/1/2017. Disponível em: <http://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2017/01/25/chacar-as-irregulares-que-afetam-a-barragem-do-descoberto-sao-retiradas/> Acesso em: 7/2/2017

DISTRITO FEDERAL. Conheça Brazlândia RA-IV. Administração Regional de Brazlândia. Disponível em: <http://www.brazlandia.df.gov.br/sobre-a-ra-iv/conheca-brazlandia-ra-iv.html>. Acesso em: 18/9/2015.

DISTRITO FEDERAL. Decreto n.º 26.007, de 5 de julho de 2005. Dispõe sobre a criação da Reserva Biológica do Rio Descoberto e dá outras providências. Diário Oficial do Distrito Federal. 6/7/2005.

DRUSCH, M., DEL BELLO, U., CARLIER, S., COLIN, O., FERNANDEZ, V., GASCON, F., HOERSCH, B., ISOLA, C., LABERINTI, P., MARTIMORT, P., MEYGRET, A., SPOTO, F., SY, O., MARCHESE, F., BARGELLINI, P. *Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services*. Remote Sensing of Environment. Volume 120, 15 May 2012, p. 25–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

ESA. *Sentinel-2 User Handbook*. European Space Agency. ESA Standart Document. Issue 1. Rev. 2. 2015.

FLETCHER, K. *Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services*. (ESA SP-1322/2 March 2012).

FREVERT, R. K., SCHWAB, G. O., EDMINSTER, T. W., BARNES, K. K. Soil and Water Conservation and Engeneering. John Wiley e sons, Inc. New York. 493 p. 1963.

MÜLLER, V. C. A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristic in the Clinch Mountain Area. New York: Virginia and Tennessee. Dept. of Geology, n.3, p. 30, 1953.

GERACE, A. D., SCHOTT, J. R., NEVINS. R. *Increased Potential to Monitor Water Quality in the Near-shore Environment with Landsat's next-generation satellite*. *Journal of Applied Remote Sensing*. 073558-1. Vol. 7, 2013. 19 f.

GIARDINO, C., BRANDO V. E., DEKKER, A. G., STRÖMBECK, N., CANDIANI, G. *Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion*. Remote Sensing of Environment 109. 2007. Pp. 183–195

GUIMARÃES, M. A., CEZAR, K. G., KOWARICK, M. A., GRANDO, R. C., BARBOSA, T. M. F., LE TOURNEAU, F. M. Histórico do uso do solo do Distrito Federal (DF) nas micro-bacias. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE

HORTON, R.E., 1932. Drainage Basin Characteristics. Trans. American Geophysical Union, 13: 350-361.

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO DISTRITO FEDERAL (IBRAM). Diagnóstico Ambiental da Faixa de Proteção do Lago Descoberto. Apresentação. 2010. 16 f. Disponível em: <http://www.descobertocoberto.df.gov.br/documentos/DiagnosticoDescobertoTRABALHOIBRAM2010.pdf> Acesso em: 24/9/2015.

INFANTI JR. N., FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. BRITO, S.N.A. (Editores) Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

IRONS, J. R., DWYER, J. L., BARSÍ, J. A. *The Next Landsat Satellite: The Landsat Continuity Mission*. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 122. 2012. p. 11–21.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres; tradução José Carlos Neves Epiphany (coordenador).. et al. – São José dos Campos – SP : Parêntese. 2009. 598 p.

JERLOV, N. G., *Marine Optics: Elsevier Scientific Pub*: Amsterdam, 1976. 231 p.  
KIRK, J.T.O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

LIMA, W. P. Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas. USP. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Departamento de Ciências Florestais Piracicaba – São Paulo. 245 p. 2008.

LOUIS, J., CHARANTONIS, A., BERTHELOT, B. "Cloud Detection for Sentinel-2", Proceedings of ESA Living Planet Symposium (2010).

MANZO, C., BRESCIANI, M., GIARDINO, C., BRAGA, F., BASSANI, C. *Sensitivity analysis of a bio-optical model for Italian lakes focused on Landsat-8, Sentinel-2 and Sentinel-3*. European Journal of Remote Sensing. 2015, 48: 17-32

MARTINEZ, J. M., VILLAR, R. E., ARMIJOS, E., MOREIRA, L. S. *The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications of satellite-based measurements of suspended particule matter*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 120, doi: 10.1002/2014JF003404. 2015.

MARTINS, V. S., BARBOSA, C. C. F., DE CARVALHO, L. A. S., JORGE, D. S. F., LOBO, F. L., NOVO, E. M. L. M. *Assessment of Atmospheric Correction Methods for Sentinel-2 MSI Images Applied to Amazon Floodplain Lakes*. Remote Sensing. 2017, 9, 322; doi:10.3390/rs9040322

MENESES, P. R. Fundamentos de radiometria óptica spectral. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (orgs). Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais. Brasília: UnB; Embrapa Cerrados, 2001. p. 15-39.

MENESES, P. R. Princípios de Sensoriamento Remoto. In MENESES, P. R. e ALMEIDA, T. (org). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília: CNPq, 2012. 266 p.

MENEZES, P. H. B. J. Estudo da dinâmica espaço temporal do fluxo de sedimentos a partir das propriedades óticas das águas no reservatório de Três Marias – MG. Tese de doutorado. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 2013. 112 p.

MOBLEY, C. D. “Optical Properties of Water”, in *Handbook of Optics*, Second Edition, M. Bass, editor, copyright 1994 by McGraw-Hill, Inc.

MOBLEY, C. D. *Estimation of the remote-sensing reflectance from abovesurface measurements*: Applied Optics, v. 38, p. 7442-55. 1999.

MORAN, M.; JACKSON, R.; SLATER, P., TEILLET, P. *Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output*. Remote Sensing of Environment, 41, 169-184. 1992

MOREIRA, A .M. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. Ed Editora UFV, 3ª Ed., Viçosa MG, 2005.

Müller-Wilm, U. Sentinel-2 MSI – Level-2A Prototype Processor Installation and User Manual. S2PAD-VEGA-SUM-0001. Issue 2.0. Germany. 2015.

NASA. *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*. NASA's Earth Observatory System. 2002. 25f. Disponível em: [www.earthobservatory.nasa.gov](http://www.earthobservatory.nasa.gov). Acesso em: 15/12/2015.

NOVO, E. M. L. M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (orgs). Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais. Brasília: UNB; Embrapa Cerrados, 2001. p. 203-222.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Blucher, 2008. 363 p.

OLIVIETTI, D., ROIG, H. L., VILLAR, R. E., BERNINI, H., STAGE, F., MARTINEZ, J. M. Calibração e Comparação dos Sensores SPOT 5 e Landsat 8/OLI no Mapeamento de Concentração De Sólidos em Suspensão no Lago Paranoá, Brasília-DF. XII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Porto Velho/RO. 2016.

OLIVIETTI, D. Dados de coletas de campo no lago Paranoá entre 2016 e 2017. Não Publicado.

PINTO, C. E. T., MENEZES, P. H. B. J., MARTINEZ, J. M., ROIG, H. L., VILLAR, R. A. E. Uso de Imagens MODIS no Monitoramento do Fluxo de Sedimentos no Reservatório de Três Marias. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, n.5, p.507–516, 2014.

REATTO, A., MARTINS, E. S., CARDOSO, E. A., SPERA, T. S., CARVALHO JR, O. A., GUIMARÃES, R. FARIAS, M. F. R., SILVA, A. V. Relação entre as classes de solo e as principais fitofisionomias do alto curso do rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás. Planaltina/DF : Embrapa Cerrados, 2003. 28p. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X ; 111.

REATTO, A., MARTINS, E. S. FARIAS, M. F. R., SILVA, A. V., CARVALHO JR. O. A., Mapa Pedológico digital – SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Planaltina : Embrapa Cerrados. 2004. 31p. – (Documentos/Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; n.120).

REGO, I. S. Variabilidade das Propriedades Óticas Aparentes de Águas Continentais por Meio de Sensores Hiperespectrais para o Monitoramento da Qualidade das Águas. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. 2017. 113p.

RICHTER, R., WANG, X., BACHMANN, M., and SCHLAEPFER, D., "Correction of cirrus effects in Sentinel-2 type of imagery", Int. J. Remote Sensing, Vol.32, 2931-2941 (2011).

ROTTA, L. H. S., ALCÂNTARA, E. H., WATANABE, F. S. Y., RODRIGUES, T. W. P., IMAI, N. N., *Atmospheric Correction Assessment of SPOT-6 Image and Its Influence on Models to Estimate Water Column Transparency in Tropical Reservoir*. Remote Sensing



Applications: Society and Environment. PII: S2352-9385(16)30105-7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2016.09.001>. Reference: RSASE37

RUDORFF, C. M., NOVO, E. M. L. M., GALVÃO, L. S. PEREIRA FILHO, W. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. *Acta Amazônica*. Vol 37(2) 2007: 269 – 280.

RUDORFF, B. F. T., SHIMABUKURO, Y. E. ., CEBALLOS, J. C. O Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil. São José dos Campos, S P. Editora Parêntese. Ed.2007.

SANTINI, W., MARTINEZ, J. M., VILLAR, R. E., COCHONNEAU, G. VAUCHEL, P., MOQUET, J., BABY, P., ESPINOZA, J. C., LAVADO, W., CARRANZA, J. GUYOT, J. L. *Sediment budget in the Ucayali River basin, an Andean tributary of the Amazon River. Sediment Dynamics from the Summit to the Sea* (Proceedings of a symposium held in New Orleans, Louisiana, USA, 11–14 December 2014) (IAHS Publ. 367, 2014).

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p. il. Inclui apêndices.

SARI. V., CASTRO, N. M. R., KOBIYAMA, M. Estimativa da concentração de sedimentos suspensos com sensores ópticos: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Versão On-line ISSN 2318-0331. RBRH vol. 20 n°. 4 Porto Alegre out./dez. 2015 p. 816 – 836.

SCHIAVETTI, A., CAMARGO, A. F. M. Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações. Ilhéus, Ba : Editus, 2002. 293p. : il.

SPATIAL IT SOLUTIONS. Disponível em [http://pt.slideshare.net/SISPL?utm\\_campaign=profiletracking&utm\\_medium=sss&utm\\_source=ssslideview](http://pt.slideshare.net/SISPL?utm_campaign=profiletracking&utm_medium=sss&utm_source=ssslideview) Acesso em 8/3/2016.

STERCKX, S., KNAEPS, S., KRATZER, S., RUDDICK, K. *SIMilarity Environment Correction (SIMEC) applied to MERIS data over inland and coastal waters*. *Remote Sensing of Environment*. 2015, 157, 96–110.

TANRE, D., HERMAN, M., DESCHAMPS, P. Y. *Influence of the back ground contribution upon space measurements of ground reflectance*. *Applied Optics*. 1981, 20, 3676–3684.

TEILLET, P. M., GAUTIER, R. P., CHICHAGOV, A., FEDOSEJEVS, G. *Towards Integrated. Earth Sensing: Advanced Technologies for In Situ Sensing in the Context of Earth Observation*. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 28(6):713-718. 2002.

TEZA, C. T. V. Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto: as Influências da Ocupação na Disponibilidade Hídrica para Abastecimento Público. Dissertação de Mestrado. Universidade Católica de Brasília, 2008. 102 f.

THORNTON, K. W., Sedimentary Process. In THORNTON, K. W., KIMMEL, B. L. PAYNE, F. E. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. John Wiley e sons, Inc. 1990. 251 p. ISBN. 0-471-88501-0.

TOMING, K., KUTSER, T., LAAS, A., SEPP, M. PAAVEL, B. NÕGES, T. *First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery*. Remote Sensing. 2016, 8, 640; doi : 10.3390/rs8080640

TOU, J. T; Gonzalez, R. C. *Pattern Recognition Principles*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts. 1974.

TRIOS. RAMSES 40SXXX010. *Spectral imaging radiometer to measure radiance or irradiance in UV, VIS and UV/VIS*. Disponível em: <http://www.trios.de/en/products/sensors/ramses.html> Acesso em: 17/1/2017.

US GEOLOGICAL SUVEY (USGS). *Product Guide: Provisional Landsat 8 Surface Reflectance Code (LARSC) Product*. Version 3.4. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. 2016.

VANHELLEMONT, Q., RUDDICK, K., *Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8*. Remote Sensing of Environment. 145, 105–115. 2014.

VANHELLEMONT, Q., RUDDICK, K., *Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: examples from Landsat-8*. Remote Sensing of Environment. 161, 89–106. 2015.

VANHELLEMONT , Q., RUDDICK, K. *ACOLITE for Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI imagery*. Artigo submetido para 2016 ESA Living Planet Symposium. Praga, Republica Checa. ESA Special Publication SP-740. 9 a 13/05/2016.

VERMOTE, E., TANRÉ, D., DEUZÉ, J., HERMAN, M., MORCLETTE, J., KOTCHENOVA, S., *Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV)*. 6S User Guide Version 3. 2006

VERMOTE, E., JUSTICE, C., CLAVERIE, M. FRANCH, B. *Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product*. Remote Sensing of Environment 185 (2016) 46–56.

VILLAR, R. E. Monitoramento das Dinâmicas Espaciais e Temporais dos Fluxos Sedimentares na Bacia Amazônica a partir de Imagens de Satélite. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 2013. 280 f.

VILLAR, R. E., MARTINEZ, J. M., TEXIER, M., GUYOT, J. L., FRAIZY, P. MENESES, P. R. OLIVEIRA, E. *A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images*. Journal of South American Earth Sciences (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.006>

WATANANBE, F. S. Y., ALCÂNTARA, E., RODRIGUES, T. W. P., IMAI, N. N., BARBOSA, C. C. F., ROTTA, L. H. S. *Estimation of Chlorophyll-a Concentration and the*

*Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images.* International Journal of Environmental Research and Public Health. 2015, 12, 10391-10417.

ZANIN, P. R., BONUMÁ, N. B., FRANCO, D. Comportamento Hidrossedimentológico de Bacia Hidrográfica com Reservatório. Revista Geociências. São Paulo, UNESP, v. 36, n. 1, p. 185-203, 2017.