



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



CAROLINA SANTOS MELO

**DETECÇÃO DE SÓLIDOS E TURBIDEZ DA ÁGUA NOS
RESERVATÓRIOS AMADOR AGUIAR I E II EM
UBERLÂNDIA MG
USANDO IMAGENS DE SATÉLITES LANDSAT 8, MODIS E
SENTINEL 2**

Uberlândia, 2018

CAROLINA SANTOS MELO

**DETECÇÃO DE SÓLIDOS E TURBIDEZ DA ÁGUA NOS
RESERVATÓRIOS AMADOR AGUIAR I E II EM
UBERLÂNDIA MG
USANDO IMAGENS DE SATÉLITES LANDSAT 8, MODIS E
SENTINEL 2**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento / Geomática

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

Uberlândia, 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M528d Melo, Carolina Santos, 1988-
2018 Detecção de sólidos e turbidez da água nos reservatórios Amador Aguiar I e II em Uberlândia MG usando imagens de satélites Landsat 8, Modis e Sentinel 2 [recurso eletrônico] / Carolina Santos Melo. - 2018.

Orientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.7015>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia Civil. I. Schmidt, Marcio Augusto Reolon, , (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

André Carlos Francisco
Bibliotecário - CRB-6/3408



ATA

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

ATA Nº: 221/2018

CANDIDATA: Carolina Santos Melo **Nº. Matrícula:** 11612ECV012

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

TÍTULO: “Detecção de sólidos e turbidez da água nos reservatórios Amador Aguiar I e II em Uberlândia-MG usando imagens de satélites LandSat 8, Modes e Sentinel 2”.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Engenharia Urbana

PROJETO DE PESQUISA: Análise Espacial Ambiental

DATA DA DEFESA: 06 de agosto de 2018

LOCAL: Sala de Reuniões Prof. Márcio Antônio Ribeiro da Silva, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 14h às 16:10h

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGE, assim composta pelos Professores Doutores: **Jorge Luis Silva Brito – IG/UFU; Rodrigo Mikosz Gonçalves – CTG/UFPE e Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt – FECIV/UFU** orientador da candidata. Ressalta-se que o **Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves** participou da banca via webconferência desde a cidade de Recife/PE e os demais membros da banca e a aluna participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu à discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata **APROVADA**. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Membros titulares:

Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt – FECIV/UFU

Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves – CTG/UFPE

Prof. Dr. Jorge Luis Silva Brito – IG/UFU



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Augusto Reolon Schmidt, Coordenador(a)**, em 07/08/2018, às 14:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Mikosz Gonçalves, Usuário Externo**, em 09/08/2018, às 20:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luis Silva Brito, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/08/2018, às 14:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0626755** e o código CRC **A3B67F14**.

RESUMO

Esta pesquisa aborda a utilização de imagens de satélite para monitoramento da qualidade da água em seus parâmetros de sólidos totais e turbidez. O objetivo é avaliar o uso do sensoriamento remoto na qualidade da água em reservatórios, possibilitando um monitoramento abrangente, contínuo e de baixo custo. A área de estudo são os reservatórios Amador Aguiar I e II, possuem 18,66km² e 45,11km² de área inundada, respectivamente, e estão localizados no baixo curso do rio Araguari no Estado de Minas Gerais. Foram coletadas oito amostras em cada reservatório, nos meses de novembro de 2017 e janeiro de 2018, e realizadas análises para quantificação de sólidos totais e turbidez. Os resultados indicaram que as águas superficiais na região amostral estavam homogêneas. Em cada ponto amostral, foram analisados os valores dos pixels (refletância processada) das imagens dos três satélites utilizados, em suas faixas espectrais correspondentes às bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (IRP). As variações entre os valores dos pixels nos pontos amostrais foram baixas, seguindo o mesmo padrão dos resultados de sólidos e turbidez nesses pontos. Foi aplicada a análise de variância anova para verificar se houve diferenças estatisticamente significativas para os valores dos sólidos totais, turbidez e refletâncias dos satélites. Como resultado, foi possível estabelecer equações polinomiais que explique a relação entre sólidos totais e a turbidez com os valores de pixels das bandas em cada satélite analisados.

Palavras-chave: Radiação eletromagnética - Reservatório – Qualidade da água – Monitoramento – Sensoriamento Remoto

ABSTRACT

This research addresses the use of satellite images to monitor water quality in its parameters of total solids and turbidity. With the objective of evaluating the use of remote sensing in the water quality in reservoirs, allowing a comprehensive, continuous and low cost monitoring. The study area is Amador Aguiar reservoirs II and I with 18.66km² and 45.11km² of flooded area, respectively, and are located in the low course of the Araguari river in the State of Minas Gerais. Eight samples were collected in each reservoir, in the months of November 2017 and January 2018, and analyzes were performed for quantification of total solids and turbidity. The results indicated that the surface waters in the sampled region were homogeneous. At each sampling point, the values of the pixels (processed reflectance) of the images of the three satellites used were analyzed in their spectral bands corresponding to the blue, green, red and near infrared (IRP) bands. The variations between the pixel values at the sample points were low, following the same pattern of solids and turbidity at these points. The analysis of variance anova was applied to verify if there were statistically significant differences for the values of total solids, turbidity and satellite reflectance. As a result, it was possible to establish polynomial equations that explain the relationship between total solids and turbidity with the pixel values of the bands in each satellite analyzed.

Keywords: Electromagnetic radiation - Reservoir - Water quality - Monitoring - Remote Sensing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Espectro eletromagnético com níveis de frequência e intensidade	13
Figura 2:	Fluxo de radiância emitida e irradiância incidente sobre um objeto	15
Figura 3:	Absorção e espalhamento da água em estado puro.	17
Figura 4:	Sensores passivos, que utilizam o sol como fonte de radiação.	18
Figura 5:	Imagem das janelas atmosféricas, os picos em azul indicam os comprimentos de onda onde a radiação é absorvida por vários gases que compõem a atmosfera. ..	23
Figura 6:	Efeitos sofridos pela radiação ao interagir com os diferentes meios que constituem o planeta .	24
Figura 7:	Efeitos da inclinação do alvo na irradiância solar	27
Figura 8:	Processo de Fusão de imagem Pancromática com multiespectral no software Orfeo Monteverdi	28
Figura 9:	Imagem sintética, derivada do processo de fusão das bandas multiespectrais de 30 metros com a pancromática de 15 metros	29
Figura 10:	Espaço de cor IHS	30
Figura 11:	Fusão de imagens utilizando a técnica de Gram Schmidt	31
Figura 12:	Exemplo de uma transformação por Principais Componentes	32
Figura 13:	Exemplo de canais gerados a partir dos dados de variância dos vetores	32
Figura 14:	Fusão de imagens utilizando a técnica de principais componentes	33
Figura 15:	Fusão de imagens utilizando a técnica de Brovey	34
Figura 16:	Fusão de imagens utilizando a técnica multiplicativa (CN)	35
Figura 17:	Curvas espectrais de refletância para alguns elementos .	40
Figura 18:	Localização da área de estudo	47
Figura 19:	Fluxograma das coletas realizadas nos reservatórios e as imagens de satélite analisadas.	52

Figura 20: Valores de refletância da banda 2 da imagem Landsat 8 da data de 29/11/2017, destacando o recorte da área do reservatório e os pontos de coleta de amostra de água	54
Figura 21: Valores de refletância da banda 2 da imagem Landsat 8 da data de 29/11/2017, destacando o recorte da área do reservatório Amador Aguiar II e os pontos de coleta de amostra de água	55
Figura 22: Fluxograma de aquisição, processamento e análise estatística das imagens Landsat 8, Sentinel 2 e Modis com os resultados de sólidos totais e turbidez.	56
Figura 23: Interpolação dos resultados de sólidos totais nos reservatórios Amador Aguiar I e II.	58
Figura 24: Interpolação dos resultados de turbidez nos reservatórios Amador Aguiar I e II	59
Figura 25: valores de refletância da area de estudo nas bandas 2, 3, 4, 5 e 8 do satélite Landsat-8 da data de 29/11/2017 .	60
Figura 26: valores de refletância da area de estudo nas bandas 2, 3, 4, 5 e 8 do satélite Landsat-8 da data de 17/02/2018	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1:	Comparação das faixas espectrais azul e verde dos satélites Modis, Landsat8 e Sentinel 2	41
Gráfico 2:	Comparação das faixas espectrais vermelho e infravermelho dos satélites Modis, Landsat 8 e Sentinel	42
Gráfico 3:	Comparação dos valores de refletância (eixo y) nos satélites Modis, Sentinel e Landsat,, nos pontos de coleta das amostras de água (eixo x)	62
Gráfico 4:	Comparação dos valores de refletância nos pontos amostrais dos satélites Sentinel e Landsat8	63
Gráfico 5:	Correlação polinomial de quarta ordem entre os valores de Sólidos Totais e turbidez no reservatório Amador Aguiar	64
Gráfico 6:	Correlação polinomial de quarta ordem entre os valores de Sólidos Totais e turbidez no reservatório Amador Aguiar	64
Gráfico 7:	Correlação polinomial de sexta ordem entre os valores de refletância das imagens Landsat 8 e os resultados de sólidos totais e turbidez	66
Gráfico 8:	Correlação polinomial de sexta ordem entre os valores de refletância das imagens Sentinel2 e os resultados de sólidos totais e turbidez no reservatório Amador Aguiar I	67
Gráfico 9:	Variações de medidas de turbidez nos reservatórios Amador Aguiar I (a) e análise de resíduos (b)	71
Gráfico 10	Variações de medidas de sólidos totais nos reservatórios Amador Aguiar I (a) e análise de resíduos (b)	71

Gráfico 11	Variações de medidas de turbidez nos reservatórios Amador Aguiar II (a) e análise de resíduos (b)	71
Gráfico 12:	Variações de medidas de turbidez nos reservatórios Amador Aguiar II (a) e análise de resíduos (b)	72
Gráfico 13:	Variações de refletância na banda 2 do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I	80
Gráfico 14	Variações de refletância na banda 2 do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar I	80
Gráfico 15	Variações de refletância na banda 3 do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I	80
Gráfico 16:	Variações de refletância na banda 3 do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar I	80
Gráfico 17:	Variações de refletância na banda 4 do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I	80
Gráfico 18	Variações de refletância na banda 4 do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar I	80
Gráfico 19	Variações de refletância na banda 5 do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I	81
Gráfico 20	Variações de refletância na banda 8 do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar	81
Gráfico 21	Variações de refletância das bandas do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar II	82
Gráfico 22	Variações de refletância nas bandas do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar II	82

Gráfico 23	Variações de refletância dos pontos amostrais nas bandas do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar II	83
Gráfico 24	Variações de refletância dos pontos amostrais nas bandas do satélite sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar II	83
Gráfico 25	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do Landsat 8	84
Gráfico 26	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 3 do Landsat 8	85
Gráfico 27	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 4 do Landsat 8	85
Gráfico 28	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 5 do Landsat 8	85
Gráfico 29	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do Sentinel 2	86
Gráfico 30	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 3 do Sentinel 2	86
Gráfico 31	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 4 do Sentinel 2	86
Gráfico 32	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 8 do Sentinel 2	86
Gráfico 33	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 8A do Sentinel 2	87
Gráfico 34	Polinômio de terceiro grau para os parâmetros de turbidez e banda 1 do sensor Modis	87

Gráfico 35	Polinômio de terceiro grau para os parâmetros de turbidez e banda 1 do sensor Modis	87
Gráfico 36	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do Landsat 8	88
Gráfico 37	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 3 do Landsat 8	88
Gráfico 38	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 4 do Landsat 8	88
Gráfico 39	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 5 do Landsat 8	88
Gráfico 40	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do Sentinel 2	89
Gráfico 41	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 3 do Sentinel 2	89
Gráfico 42	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 4 do Sentinel 2	89
Gráfico 43	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 8 do Sentinel 2	89
Gráfico 44	Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 8A do Sentinel 2	90
Gráfico 45	Polinômio de terceiro grau para os parâmetros de sólidos totais e banda1 do sensor Modis	90
Gráfico 46	Polinômio de terceiro grau para os parâmetros de sólidos totais e banda2 do sensor Modis	90

Gráfico 47	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do Landsat 8	91
Gráfico 48	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 3 do Landsat 8	91
Gráfico 49	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 4 do Landsat 8	91
Gráfico 50	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 5 do Landsat 8	92
Gráfico 51	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do Sentinel 2	92
Gráfico 52	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 3 do Sentinel 2	92
Gráfico 53	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 4 do Sentinel 2	92
Gráfico 54	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 8 do Sentinel 2	93
Gráfico 55	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 8A do Sentinel 2	93
Gráfico 56	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de turbidez e banda 1 do sensor Modis	93
Gráfico 57	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do sensor Modis	93
Gráfico 58	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do Landsat 8	94

Gráfico 59	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 3 do Landsat 8	94
Gráfico 60	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 4 do Landsat 8	95
Gráfico 61	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 5 do Landsat 8	95
Gráfico 62	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do Sentinel 2	95
Gráfico 63	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 3 do Sentinel 2	95
Gráfico 64	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 4 do Sentinel 2	96
Gráfico 65	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 8 do Sentinel 2	96
Gráfico 66	Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 8A do Sentinel	96
Gráfico 67	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 1 do sensor Modis	96
Gráfico 68	Polinômio de segundo grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do sensor Modis	97
Gráfico 69	Valores de refletância das bandas do Landsat 8 nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I	99
Gráfico 70	Valores de refletância das bandas do Sentinel 2 nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I	99

Gráfico 71	Valores de refletância das bandas do Landsat 8 nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar II	99
Gráfico 72	Valores de refletância das bandas do Sentinel 2 nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar II	99
Gráfico 73	Valores de refletância das bandas do Sensor Modis nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I	99
Gráfico 74	Valores de refletância das bandas do Sensor Modis nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I	99
Gráfico 75	Resultado da razão das bandas nos pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I	101
Gráfico 76	Resultado da razão das bandas nos pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I	101
Gráfico 77	Resultado da variância da razão de banda NIR/RED do satélite Landsat-8 no reservatório Amador Aguiar I	102
Gráfico 78	Resultado da variância da razão de banda NIR/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I	102
Gráfico 79	Resultado da variância da razão de banda RED-ED4/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I	103
Gráfico 80	Resultado da variância da razão de banda NIR/RED do satélite Landsat-8 no reservatório Amador Aguiar II	104
Gráfico 81	Resultado da variância da razão de banda NIR/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I	104
Gráfico 82	Resultado da variância da razão de banda RED-ED4/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar II	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Escala dos intervalos de valores espectrais	14
Tabela 2:	Resoluções espaciais e espectrais dos sensores Modis, Landsat-8 e Sentinel-2	20
Tabela 3:	Correlação entre as respostas espectrais das bandas do sensor Modis e dados do espectro	38
Tabela 4:	Experimentos de fator único com teste de Anova - <i>one way</i>	43
Tabela 5:	Modelo de tabela da Anova	43
Tabela 6:	Resultados de sólidos totais e turbidez por pontos amostrais	57
Tabela 7:	Valores de correlação da ordem 2 a 6, entre os resultados de sólidos totais e turbidez	64
Tabela 8:	Resultados da correlação polinomial dos parâmetros de sólidos totais e turbidez e as bandas dos satélites Landsat, Modis e Sentinel.	65
Tabela 9:	Análise dos valores de Turbidez do reservatório Amador Aguiar I	69
Tabela 10:	Análise dos valores de sólidos totais do reservatório Amador Aguiar I	69
Tabela 11:	Análise dos valores de Turbidez do reservatório Amador Aguiar II	70
Tabela 12:	Análise dos valores de sólidos totais do reservatório Amador Aguiar II	70
Tabela 13:	Resultado da Anova para os parâmetros de turbidez e sólidos totais	72
Tabela 14:	Teste Tukey HSD com variável Turbidez	73
Tabela 15:	Tukey HSD com variável sólidos totais	73
Tabela 16:	Valores de correlação da ordem 2 a 6,entre os resultados de sólidos totais e turbidez	74
Tabela 17:	Resultado da Anova para as bandas do Sentinel 2	75

Tabela 18:	Tukey HSD; variável banda 2 Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I	76
Tabela 19:	Tukey HSD; variável banda 3 Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I	76
Tabela 20:	Tukey HSD; variável banda 4 Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I	76
Tabela 21:	Tukey HSD; variável banda 8 Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I	76
Tabela 22:	Tukey HSD; variável banda 8A Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I	77
Tabela 23:	Resultado da Anova para as bandas do Landsat-8	77
Tabela 24:	Teste Tukey HSD; variável Refletância na Banda 2 do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar I	78
Tabela 25:	Teste Tukey HSD; variável Refletância na Banda 3 do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar I	78
Tabela 26:	Teste Tukey HSD; variável Refletância na Banda 4 do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar I	78
Tabela 27:	Teste Tukey HSD; variável Refletância na Banda 8 do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar I	78
Tabela 28:	Análise de variância dos valores de pixels nos pontos centrais das amostras com os valores de refletância das bandas do satélite Landsat-8	81
Tabela 29:	Análise de variância dos valores de pixels nos pontos centrais das amostras com os valores de refletância das bandas do satélite sentinel-2	81
Tabela 30:	Resultados da correlação polinomial ajustada dos parâmetros de sólidos totais e turbidez e as bandas dos satélites Landsat, Modis e Sentinel	97
Tabela 31:	Tukey HSD; variável NIR/RED do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I	102
Tabela 32:	Tukey HSD; variável NIR/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I	102
Tabela 33:	Tukey HSD; variável RED-ED4/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I	102
Tabela 34:	Tukey HSD; variável NIR/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar II	104
Tabela 35:	Tukey HSD; variável NIR/RED do satélite Sentinel2A no reservatório Amador Aguiar II	104

Tabela 36	Tukey HSD; variável RED-ED4/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar II	104
Tabela 37	Valores de R^2 das ordens polinomiais para os parâmetros de sólidos totais e turbidez com os resultados das razões de bandas no reservatório amador Aguiar I	105
Tabela 38	Valores de R^2 das ordens polinomiais para os parâmetros de sólidos totais e turbidez com os resultados das razões de bandas no reservatório amador Aguiar II	105

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>Rem</i>	- Radiação eletromagnética
λ	- Comprimento de Onda
<i>Pan</i>	- Imagem pancromática
<i>L8</i>	- Satélite Landsat-8
<i>S2A</i>	- Satélite Sentinel-2 A
<i>NIR</i>	- Banda Infravermelho próximo
<i>RED</i>	- Banda Vermelha
<i>RED-ED</i>	- Banda vermelho limítrofe

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANA</i>	– Agência Nacional das Águas
<i>CCBE</i>	– Consórcio Capim Branco de Energia
<i>MMA</i>	– Ministério do Meio Ambiente
<i>MODIS</i>	- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
<i>MSI</i>	- Multispectral Instrument sensor
<i>OLI</i>	- Operational Land Imagem

Sumário

LISTA DE TABELAS	18
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS	5
1.1.1 Geral.....	5
1.1.2 Específicos	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 RECURSOS HIDRICOS	6
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO	13
2.2.1 Resoluções Dos Satélites.....	18
2.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	22
2.3.1 Correção Atmosférica	23
2.3.2 Correção do azimute de iluminação	26
2.3.3 Fusão de Imagem	27
2.4 SENSORIAMENTO REMOTO EM RECURSOS HÍDRICOS	35
2.5 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA.....	42
3 MATERIAIS	45
3.1 ÁREAS DE ESTUDO.....	45
3.2 AJUSTES NAS IMAGENS	48
4. MÉTODOS	51
4.1. COLETA E PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS DE ÁGUA	51
4.2. FUSÃO DE IMAGENS	53
4.3. ANÁLISE DAS IMAGENS E CRUZAMENTO DOS DADOS	55
4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
5.1. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE SÓLIDOS TOTAIS E TURBIDEZ.....	69
5.2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS IMAGENS DE SATÉLITE	74
5.3. MODELOS DA LITERATURA	100
6. CONCLUSÃO.....	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos dois anos, algumas regiões do país, têm atravessado uma crise hídrica com redução significativa da distribuição e alterações de volume das chuvas, o que tem dispensado mais atenção ao gerenciamento desse recurso (PNRH / ANA 2016). Uma importante iniciativa foi a revisão do Plano Nacional de Recursos Hídricos, que prioriza amenizar os efeitos da crise hídrica e do aquecimento Global (MMA, 2017). Segundo esse documento, o ano de 2014 foi caracterizado por eventos extremos de escassez de precipitação que resultou em problemas de abastecimento na região sudeste, enquanto em 2015 na região norte e sul o excesso de chuvas causou enchentes e inundações (PNRH / ANA 2016).

A criação ou ampliação dos reservatórios de acumulação é uma das medidas para conter os efeitos desses eventos extremos de escassez e ou inundações, no entanto, impactam todo o ecossistema das bacias hidrográficas na qual são alocadas (Espinoza et al. 2012).

Sob o aspecto da qualidade da água, estes impactos podem causar alterações físicas, químicas e biológica da água (ANA, 2016), tais como o enriquecimento de nutrientes em ambiente aquático, que é uma das principais causas de eutrofização, e são influenciadas por alterações ambientais e atividades antrópicas (ZHANG, et al. 2017).

A preservação das áreas do entorno, tipos de vegetação e solo, além da profundidade dos reservatórios podem causar impactos negativos ou positivos dependendo da maneira em que estão dispostos no ecossistema. A interferência humana, é outro fator que contribui para o aumento de compostos na água, que podem ser de origem química, provenientes do lançamento de efluentes (pontuais ou difusos) e de defensivos agrícolas.

Os sólidos encontrados na água compõem suas características físicas, e os contaminantes de origem química, ambos contribuem para o aumento da carga de sólidos transportados pelos cursos d'água. Por isso, existe a necessidade do constante controle e monitoramento da concentração de cada componente presente nas águas destes reservatórios.

Por esta razão, é fundamental o monitoramento contínuo a fim de avaliar a qualidade e quantidade desse recurso, para verificação se os níveis encontrados atendem a demanda a

que se destina o reservatório.

Diante desse contexto, o monitoramento do transporte, sedimentação de sólidos e monitoramento do uso e ocupação do solo nas áreas próximas é primordial para identificação e possíveis intervenções no controle da qualidade da água em reservatórios de acumulação, a fim de manter e garantir quantidade e qualidade de água para as múltiplas demandas de utilização.

O sistema de monitoramento de recursos hídricos, quando realizados adequadamente, abrangendo tanto a qualidade como a quantidade possibilita avaliar a oferta hídrica para as decisões de aproveitamento integrado da água com redução de impactos ao meio ambiente (Coimbra, 1985).

No entanto, no Brasil, nem todos dos Estados conseguem monitorar suas águas devido ao alto custo de logística, equipamentos e mão de obra especializada (ANA, 2017). Quando competem à iniciativa privada as análises são realizadas utilizando métodos distintos, podendo resultar em análises divergentes com amostras semelhantes (ANA, 2017).

Apesar do Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas, desenvolvido no intuito de amenizar essa deficiência, o monitoramento ainda tem grandes lacunas espaciais e temporais, pois, ainda enfrentam a dificuldade e o elevado custo das coletas de amostras pontuais (ANA, 2017), diante disso, ocorre também a demora na disponibilização das informações.

A área de estudo é o complexo energético Capim branco, composto pelas usinas hidrelétricas Amador Aguiar I e II, localizadas no baixo curso do rio Araguari, na divisa dos municípios de Uberlândia e Araguari, No Estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil. O reservatório Amador Aguiar I, segundo o Consorcio Capim Branco de Energia (CCBE, 2017), possui 18,66 km² de área inundada, com volume total de armazenamento de 241 milhões de m³.

O reservatório Amador Aguiar II possui área inundada de 45,11 km², e o volume total corresponde a 872,82 milhões de m³. As UHE apresentam-se em 3 unidades para cada reservatório e geram 80 MW e 70 MW para cada unidade, respectivamente aos reservatórios I e II. Esses reservatórios ainda têm influência do remanso da UHE de Itumbiara (CCBE, 2017).

Esta pesquisa se justifica na importância do bioma Cerrado, no qual se encontram as maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Ministério do Meio Ambiente, 2017), além de ser uma região de recarga do aquífero Guarani, maior reserva de água subterrânea da América do Sul, esse bioma adquiriu importância econômica dada a produção de grãos e carnes para a exportação.

Outro fator importante é o crescimento demográfico e o consequente aumento do consumo e despejo humano. O reservatório da hidrelétrica Amador Aguiar I está passando por adaptações para a realização de captação de água para a cidade de Uberlândia, seu potencial será maior que os dois atuais existentes no município, as obras serão realizadas em três etapas, somente a primeira é prevista para que consiga abastecer 1,5 milhão de habitantes (Departamento Municipal de Água e esgoto de Uberlândia, 2017).

Dada a escala e área de abrangência uma alternativa de monitoramento em escala regional é o uso de sensoriamento remoto por satélites imageadores ou radar, sistemas de informação geográfica e outros, complementados com coletas in loco, como no caso de qualidade de água superficial. Jafar-Sidik *et al.* (2017), relata que os métodos de medições dos parâmetros da água, são caros, tanto em tempo quanto em custo, quando comparado com as técnicas de sensoriamento remoto, principalmente em grandes áreas.

Existem satélites desenvolvidos com objetivo de monitorar as águas oceânicas como no caso dos satélites Aqua e Terra (NASA, 2017). Contudo, diferentemente das águas oceânicas, a principal dificuldade em monitoramento de águas interiores é a escala. A exigência de sensores remotos com níveis de detalhamento espacial apurado, aliado a diversidade de solos, uso da terra, níveis de poluição, resultou em pouco interesse em desenvolver pesquisas neste campo. Outra dificuldade em obter informações de sensores orbitais, consiste na temporalidade dos dados.

Contudo, as limitações inerentes das resoluções de cada satélite influenciam na análise das informações, portanto, uma forma de amenizar essa limitação é o uso de imagens de diferentes sensores com o intuito de extrair as melhores resoluções em cada sensor, esta técnica é conhecida como fusão de imagens.

A utilização da fusão de imagens do sensor OLI com o sensor MODIS, aplicadas a esta pesquisa, visa a melhora da resolução espacial do sensor MODIS e aproveita a boa resolução

espectral e temporal desse sensor. No intuito de aplicar em águas de baixa turbidez e comparando se há maior acurácia do que quando utilizado cada sensor isolado.

Neste contexto, a hipótese formulada para esta pesquisa é que a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens, como a fusão de imagens de diferentes escalas e diferentes larguras de faixa espectral, e a correção de parâmetros radiométricos e atmosféricos, resultando em imagens sintéticas, podem melhorar a identificação da concentração de sólidos em reservatórios de acumulação na região do Triângulo Mineiro.

Portanto, esta pesquisa utiliza-se do satélite Sentinel 2 (sensor MSI) o satélite Aqua (sensor Modis) e o satélite Landsat 8 (sensor OLI). A proposta é usar técnica de fusão das imagens do sensor Modis, que possuem uma alta resolução espectral, com as imagens Landsat 8 e comparar os resultados com o Sentinel 2, que possuem maior resolução espacial, e verificar se há melhoras significativas na distinção e determinação de sólidos totais e turbidez na água de reservatórios de acumulação.

Dada as diferenças das imagens em relação a datas de aquisição, processamento, atitudes de cada plataforma, foi necessário proceder correções atmosféricas e normalização do número de bits além de outros parâmetros específicos.

Na metodologia dessa pesquisa foi realizado o processo de classificação supervisionada das imagens de satélite para a extração das áreas dos reservatórios. A coleta e processamento de amostras coletadas aleatoriamente em campo, para medidas de turbidez e sólidos totais, as quais foram comparadas com os valores de refletância das imagens de satélite

Diante da incerteza das medidas, e como forma de validar a proposta, foi utilizada a anova e o erro médio quadrado nos resultados obtidos, como forma de estabelecer uma correlação e a covariância dos valores observados nos pixels das imagens com os valores encontrados nas amostras de campo, por fim, traçou a linha de tendência para chegar a uma equação que relacione valores de refletância com totais de sólidos e turbidez.

Como resultado busca-se uma relação direta entre os valores de refletância da água medidos por satélite e a quantidade de sólidos, sem a necessidade de medições na superfície do reservatório.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Analisar a alteração da resposta espectral da água em função da análise de seus parâmetros físicos de sólidos totais e turbidez, nos reservatórios Amador Aguiar I e II utilizando sensores dos satélites Sentinel-2, Landsat 8 e Aqua, comparando as bandas na faixa espectral do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, e razão entre bandas, através do procedimento de processamento digital de imagens, para avaliar o uso desta ferramenta no monitoramento de qualidade da água em reservatórios de acumulação.

1.1.2 Específicos

- Quantificar a variação da refletância da água corrigida da refração atmosférica e azimuth das imagens de satélites para correlacioná-las a turbidez e sólidos totais em reservatórios;
- Analisar como as resoluções espacial, espectral e radiométrica de cada satélite influenciam na detecção das variações de turbidez e sólidos na água, verificando a acurácia dos resultados de acordo com as resoluções das imagens;
- Estabelecer entre os modelos de Espinoza (2012) e Robert et al. (2016), resultados que indiquem o nível detalhamento de sólidos na água, ampliando a comparação com uso das imagens fusionadas a partir dos satélites Modis, Landsat e Sentinel, e definir seu grau de correlação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RECURSOS HIDRICOS

A água é um elemento primordial para a manutenção da vida na Terra, seu ciclo influencia na temperatura e caracterização do clima do planeta, no ciclo do carbono, na formação e movimento das massas de ar, na manutenção dos ecossistemas e por isso demandam planejamento que seja eficaz ao nível de suprir todas as necessidades que lhe são atribuídas.

A água também serve de habitat para várias espécies além de ser um recurso essencial para a espécie humana, seja para consumir, utilizar na produção de alimentos, ou na indústria, agricultura ou criação de animais. A demanda de água em ambientes urbanos ou rurais demanda planejamento e controle qualitativo e quantitativo (Lei 9433/97).

O Brasil, devido a sua extensão territorial, possui uma grande variedade climática e a maior biodiversidade do planeta (PNE 2030) sendo beneficiado pelas maiores reservas de água doce continental do mundo. Dentro de seu território esse recurso natural se encontra distribuído de forma desigual, assim como as suas demandas (Freitas, et al. 2001). Essa abundancia trazem vantagens para o país em termos de disponibilidade hídrica, mas ao mesmo tempo, demandam um grande esforço de gerenciamento para garantir que a utilização de tais recursos seja feita de forma sustentável (Plano Nacional de Energia 2030).

Apesar de possuir um extenso território com abundância de recursos hídricos, o país tem problemas de abastecimento em algumas regiões, devido a desigualdade na distribuição regional como na região semiárida do nordeste brasileiro e crises hídricas nos grandes centros urbanos, como a cidade de São Paulo, são indicativos que há a necessidade de gerir de forma a garantir o abastecimento e manutenção desse recurso em seus diversos usos.

Segundo relatório da ANA (2017), 80% da água superficial que percorre o território brasileiro encontra-se na região hidrográfica amazônica, e essa região é a que possui a menor densidade demográfica, consequentemente, pouca demanda desse recurso (ANA, 2017) e a gestão da água deve propiciar o uso múltiplo evitando conflitos de interesses, além de prevenir e minimizar os efeitos de secas e inundações recorrentes no país (ANA, 2017).

Para tal deve haver uma visão descentralizada abrangendo todas as complexas questões referentes à sua utilização, para assegurar disponibilidade em quantidade e qualidade para

suprir as necessidades atuais e futuras. Contudo, além de ser um recurso essencial para a espécie humana, seja para consumir, utilizar na produção de alimentos, na indústria, agricultura ou criação de animais, a água também serve de habitat para várias espécies. A demanda de água em ambientes urbanos ou rurais demanda planejamento e controle qualitativo e quantitativo (Lei 9433/97).

A tardia atenção para a estruturação de políticas e conselhos para gestão dos recursos hídricos comprova a falta de informações sobre os impactos a longo prazo das modificações realizadas nos cursos de água, além da falta de conhecimento sobre a qualidade das águas superficiais em grande parte do território brasileiro (Novo, 2007).

A PNRH foi implantada aos poucos e sua estruturação através de instituições foram a partir daí sendo criadas. A Agência Nacional de Águas (ANA) é uma autarquia ligada ao Ministério de Meio Ambiente, criada somente no ano de 2000 através da lei 9987/00, seu objetivo principal é de implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos, e gerir os recursos hídricos de domínio da união.

Oliveira (2008) aborda que o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos ocorre de forma descentralizada e com a participação de diversos setores da sociedade. Caracterizando como positivo, pois abre espaço para uma melhor discussão e troca de informações e experiência abrangendo todos os interesses de usos bem como sua preservação.

Os recursos hídricos pertencentes aos Estados ficam sob responsabilidade dos órgãos ambientais de cada um deles. No caso do Estado de Minas Gerais o órgão responsável pelo gerenciamento dos recursos hídricos é o IGAM, que implementou a Política estadual de gerenciamento de recursos hídricos (SEGRH) aplicados aos recursos hídricos pertencente ao Estado, criado pela lei 13199/99 (IGAM, 2017).

No entanto a descentralização também ocorre no monitoramento dos reservatórios, caracterizando-se como negativo, pois, se tratando de monitoramento de água, o problema da descentralização é a falta de unificação tanto das metodologias de coleta e análise quanto da unificação dos resultados tornando difícil a assimilação e análise visando a gestão dos recursos hídricos (Novo, 2007).

No Brasil, como ocorre em outros países do mundo, uma forma comum de gerir os recursos hídricos, é através da construção de reservatórios de regularização (Nunes, 2013). O potencial hídrico do país é favorável a construção de reservatórios a fim de suprir as necessidades de abastecimento. Reservatório pode ser definido como o acúmulo de água resultante da construção de barragens, estas são barreiras físicas construídas no intuito de represar água (ANA, 2017). Essa intervenção nos cursos de água é realizada para os mais variados usos, seja hidrelétrico, para armazenamento, abastecimento, controle de vazão e melhor gerenciamento de uso, garantindo dessa forma, água em todos os períodos do ano para as diversas demandas.

O sistema de acompanhamento de reservatórios (SAR) obtém informações diárias sobre a quantidade de água (vazão, cota, volume útil, vazão turbinada), no entanto, a especialização do monitoramento ainda deixa grandes lacunas, pois não conseguem recobrir todas as regiões do país de forma satisfatória.

Novo (2007) aborda que, além da cobertura ineficiente da rede de monitoramento de água, a cobertura da malha hídrica brasileira também é insuficiente, pois o sistema de monitoramento não responde com agilidade as necessidades de informações devido à demora entre as coletas e a disponibilização da informação. Segundo a autora o tempo médio de disponibilidade dos dados varia de três a cinco meses após a coleta.

Atualmente há esforços para integração de todos os dados na ANA, embora a parte de quantitativa em reservatórios são medidos e enviados para a plataforma SAR diariamente, o mesmo não ocorre com a análise qualitativa.

Neste contexto, além do controle da quantidade, é necessário também o controle da qualidade da água de forma ágil, o que ainda é frequentemente realizado de forma pontual, através de coleta em pontos específicos, com distribuição irregular (ANA, 2017) e em número insuficiente diante da quantidade de reservatórios existentes no país. Para isso exige a aplicação de uma gestão eficiente e integrada, utilizando a tecnologia disponível, para a manutenção da sustentabilidade desse recurso.

Embora a expressão qualidade de água é um termo genérico e subjetivo, conforme cita Carlson (1977), a qualidade está estritamente ligada ao tipo de utilização e das atividades locais de cada região, podendo ser de melhor ou pior qualidade, esse termo, muitas vezes

confundido, é diferente do conceito de estado trófico, que pode ser mensurável e classificados como oligotrófico, mesotrófico e eutrófico.

Apesar de oferecer melhor gerenciamento dos recursos hídricos os reservatórios se configuram como grandes intervenções no sistema hidrológico natural, fragmentando um curso de água, reduzindo a velocidade da água, causando redução no potencial de autodepuração do mesmo. Consequentemente ocorre o aumento da capacidade de armazenamento de materiais orgânicos que intensifica o processo de eutrofização (Prado, 2004).

Reduzindo a clareza da água, reduz a quantidade de luz penetrante influenciando na fotossíntese, esse fato faz com que os fitoplânctons morram e sua decomposição geram bactérias que também irão consumir oxigênio, fazendo a água se tornar eutrófica, ou seja, com escassez de oxigênio e excesso de nutrientes.

A turbidez refere-se ao grau de interferência da passagem da luz através da água, conferindo uma aparência turva a ela (Von Sperling, 2005) e além do problema estético, a turbidez está relacionada à quantidade de sólidos em suspensão presente na água, que atrapalha a fotossíntese em ambiente aquático.

E esse processo ocasiona prejuízos como o aparecimento de algas e plantas aquáticas que podem entupir tubulações, danificar turbinas no caso da geração de energia, aumentar o uso de produtos para o tratamento da água, em caso de reservatórios para abastecimento.

As quantidades de sólidos presentes nos reservatórios podem comprometer a qualidade e influenciar na turbidez da água, embora não sejam os únicos elementos que causam desequilíbrio ao ambiente aquático. Estes se depositam no fundo dos leitos e causam problemas como o assoreamento, aumenta o risco de enchentes e destroem organismos que vivem em seu leito, desequilibrando a oferta de alimentos (IGAM, 2018). Os sólidos são um indicativo de transporte e sedimentação, que causa assoreamento também em barragens (Robert et al., 2016) resultando na redução da vida útil dos reservatórios.

Por definição os sólidos são estado da matéria caracterizado pela rigidez, e nas águas, sejam naturais ou residuais todas as substâncias que permanece após secagem são denominadas de sólidos, estes por sua vez podem ser classificados como totais, em suspensão, dissolvidos e sedimentáveis (SABESP, 1999)

Os sólidos em sua maioria são de origem do uso e ocupação do solo, segundo Rodrigues (2002), as mudanças na cobertura vegetal aumentam o escoamento superficial, consequentemente aumenta o fluxo dos sedimentos que se deslocam para os canais fluviais. Portanto, a quantidade de sólidos indicados nas amostras, é importante para se estudar a caracterização do entorno, principalmente a qualidade da área de Preservação Permanente.

Os sólidos totais presentes na água podem ser mensurados em miligrama por litro de água, e são identificados após a evaporação, secagem e calcinação de amostras por um determinado tempo e temperatura (IGAM, 2018), (SABESP, 1999).

Buzelli e Cunha-Santinho (2013) confirmam que a turbidez ocorre devido a movimentação de sedimentos das margens, e em maior intensidade nos períodos chuvosos, assim como os detritos orgânicos como algas, bactérias plânctons e outros. Portanto, os tipos de uso e as alterações realizadas nas áreas de entorno estão estritamente ligados ao aumento da turbidez. Pesquisas sobre a variação sazonal das águas de reservatórios como o de Barcelos et al. (2015) indicam que a turbidez teve maior correlação com a variação de acordo com a época do ano (chuvosa ou seca) este parâmetro é o maior indicador da presença de sedimentos pela precipitação, inclusive maior que as amostras de sólidos.

O sensoriamento remoto por imagens de satélite pode ser uma ferramenta eficaz no monitoramento periódico, abrangendo toda a extensão do reservatório. Os sólidos totais alteram a dinâmica de absorção e espalhamento da luz, medidos pelo índice de turbidez, tornando possível o estudo dessa alteração na resposta dos sensores dos satélites.

Novo (2007) caracteriza a turbidez e os sólidos como componentes opticamente ativos, sendo, portanto, de fácil identificação por sensoriamento remoto. Ao entrar em contato com a água a REM sofre alterações, podendo ser a refração, que consiste na mudança de direção do fluxo radiante, ou pode ser absorvida e transformada, seja pela fotossíntese ou pelo aquecimento da água, e por último a dispersão, ou espalhamento, causadas pelas partículas sólidas da água (Corazza, 2010).

Alguns estudos sobre o monitoramento da água por imagens de satélite foram realizados (Espinoza et al, 2013; Alcântara et al, 2016) em regiões de grande extensão que apresentam uma alta carga de sedimentos, típico de águas interiores.

Embora estudos em águas oceânicas por sensoriamento remoto já são mais utilizados, devido permitir resoluções espaciais médias e baixas, tais como do sensor Modis, que tem resolução

espacial de 250, 500 e 1000 metros, mas recobrem grandes faixas de imageamento com resolução temporal de um dia. Em estudos de águas oceânicas este sensor é um dos mais utilizados tais como em estudos recentes como de Robert et al. (2016) e Alexandridis et al. (2016), em lagos os satélites da série Landsat também são bem conhecidos Nichol e Nazeer (2016), Olmanson et al. (2016), Zhang, Y et al. (2017), Concha e Schott (2016), El-Zeiny e El-Kafrawy (2017).

Nos estudos de águas interiores por ferramentas de sensoriamento remoto são mais complexas e demandam resoluções espaciais e espectrais mais apuradas, embora Novo (2007) alerta que há falta de um sistema de observação terrestre configurado para dar suporte ao monitoramento das propriedades de água doce, resultando na falta de informações em termos de frequência, resolução e acurácia e por último o autor cita a baixa interação entre a comunidade de usuários de SIG e os produtores de dados, gerando uma lacuna entre dados e informação.

Alguns estudos foram realizados utilizando sensores de baixa resolução espacial, tais como Espinoza *et al.* (2012) e Robert *et al.* (2016). Ambos utilizaram o sensor Modis, no entanto as aplicabilidades desses estudos se limitam a áreas extensas, pois este sensor apresenta baixo detalhamento espacial. Entretanto, com melhora da resolução espacial dos sensores de imageamento terrestre e facilidade de aquisição das imagens, como no caso do satélite Landsat 8 e Sentinel -2, os estudos nessa temática passa a ser viável em áreas menores, tais como lagos menores, rios e reservatórios

Ainda assim os estudos da aplicação do sensoriamento remoto em rios e reservatórios vêm aumentando, tais como Alcântara et al. (2016) que estudaram a aplicação do Landsat 8 para estudo da qualidade da água no reservatório de São Simão. Jeater et al.(2012) aplicaram as técnicas de sensoriamento remoto para o estudo da concentração de fosforo no reservatório de Manso-MT, através de imagens do satélite Landsat -5, e obtiveram melhores correlações nas bandas do vermelho e infravermelho (bandas 3 e 4), segundo os autores as concentrações de fosforo não foram representativas espacialmente, mas entre os dois braços do reservatório, houve diferenças na média de concentração de fósforo, e nas respostas do satélite houve comportamento distintos entre essas duas regiões.

Vilela (2010) realizou um estudo do monitoramento da água no reservatório de São Simão, observando os valores de transparência, clorofila e turbidez, comparando-os com imagens dos satélites Landsat 5 e 7, concluiu que quanto maior a transparência aumenta a absorção

da REM na banda azul do Landsat. Nesta pesquisa também foi constatado que quanto melhor a qualidade da água os valores de nível de cinza ficam mais próximos nos diferentes pontos analisados. Para turbidez o autor utilizou a banda vermelha (banda 3 do Landsat) e constatou que quanto maior a turbidez maior o nível de cinza na banda 3, ou seja, maior a reflexão.

Espinosa et al. (2013) aplicou o sensoriamento remoto através de imagens do sensor Modis para estudo do transporte de sedimentos no rio Madeira, concluindo que as faixas do vermelho e infravermelho próximos são mais adequadas na identificação dos sólidos transportados pelo rio.

Corazza (2010) estudou o sensoriamento remoto para aplicação dos componentes opticamente ativos através de espectrorradiômetro, e concluiu que a clorofila tem maior influência nas respostas espectrais principalmente na faixa do verde, embora os sólidos presentes na água alterem os picos de refletância nas bandas próximas a 590nm.

Baptista e Machado (2016) aplicaram o sensoriamento remoto para monitoramento do lago Paranoá no Distrito Federal, utilizando as bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo do satélite Landsat 5 para estimar concentrações de fósforo total, clorofila e transparência, através do índice do Carlson, que analisa o Índice de estado trófico para cada um dos parâmetros analisados.

Portanto, é crescente a aplicação do sensoriamento remoto em monitoramento das águas superficiais interiores, embora os não foram desenvolvidos para essa finalidade específica, esses estudos sinalizam que é possível monitorar parâmetros que sejam opticamente ativos encontrados na água.

Para o Brasil, em especial devido à grande disponibilidade hídrica e seu território extenso o monitoramento de rios, lagos e reservatórios por sensoriamento remoto pode se tornar uma ferramenta eficiente para gestão integrada aos mecanismos que existem atualmente. Diante disso, a aplicabilidade do sensoriamento remoto torna-se mais abrangente, fato que, ajudam a refinar futuras técnicas que podem vir a prever uma nova caracterização ambiental que atenda às expectativas de sustentabilidade ambiental, seja em ambiente lótico ou lântico, em vários níveis de qualidade.

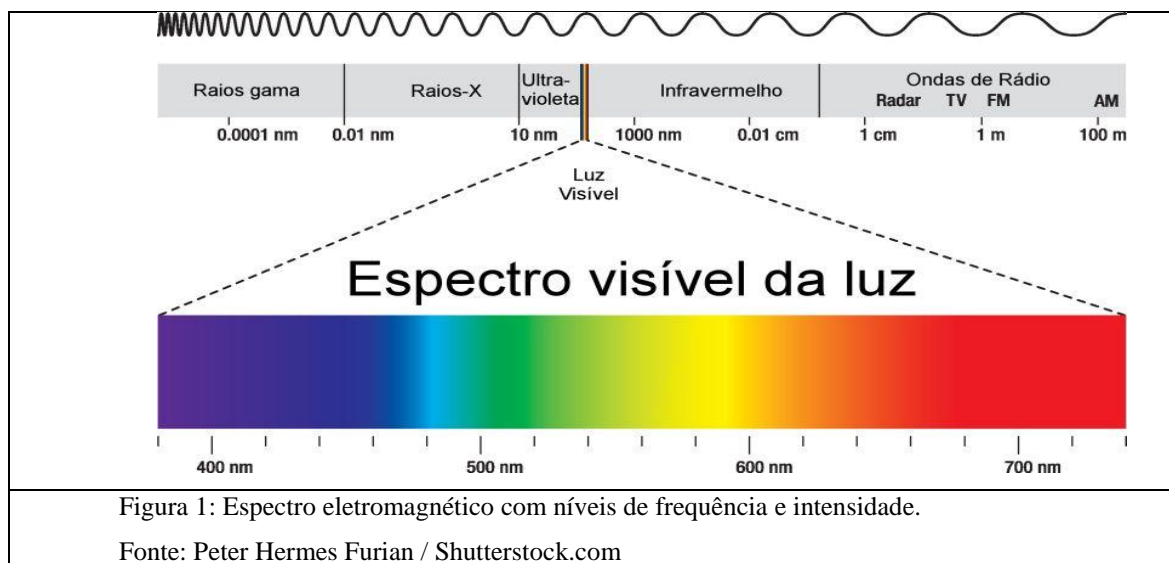
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO

Conceitualmente, o sensoriamento remoto é uma técnica que auxilia na compreensão do espaço terrestre, contribuindo com informações de regiões sem a necessidade de se ter um contato físico com ela. A extração remota de informações pode ser feita por vários tipos de dispositivo, dentre os quais estão as câmeras, lasers, sonares, sistemas de radar, entre outros (Jensen, 2009, p.4) e classificados como orbitais (satélites artificiais) ou sub orbitais (radares, espectro radiômetros embarcados).

O sensoriamento remoto utiliza-se da radiação eletromagnética (REM) para captar informações sobre os elementos que interagem com ela, essa radiação é composta basicamente por modelos ondulatórios, que são as ondas em seus vários comprimentos, e modelos corpusculares, composto por energia (Almeida e Meneses, 2012, p.4).

Os agrupamentos dos valores de comprimento das ondas dão origem ao espectro eletromagnético, que são faixas de valores que variam da alta frequência e intensidade, como exemplo, os raios cósmicos, e atingem ondas maiores de menor frequência e intensidade, como sinais de rádio e TV (figura 1). Embora a faixa de radiação da REM é ilimitada e o espectro é contínuo, ele foi dividido em faixas de acordo com o comprimento de onda com base nos mecanismos físicos de geração e detecção da REM (Almeida e Menezes, 2012. P.18)

A faixa espectral mais conhecida, devido ser visível ao olho humano é a faixa do espectro



visível, compostos pelas cores variando do violeta ao vermelho, embora seus intervalos não

tenham limites rigorosos, a tabela 1 apresentada por Almeida e Menezes (2012), mostram as divisões dos comprimentos de ondas das cores na região do espectro visível.

Tabela 1: escala dos intervalos de valores espectrais.

Comprimento de onda (μm)	Cor da luz refletida
0,380 - 0,455	Violeta
0,455 - 0,482	Azul
0,482 - 0,487	Azul esverdeado
0,487 - 0,493	Azul verde
0,493 - 0,498	Verde azulado
0,498 - 0,530	Verde
0,530 - 0,559	Verde amarelado
0,559 - 0,571	Amarelo verde
0,571 - 0,576	Amarelo esverdeado
0,576 - 0,580	Amarelo
0,580 - 0,587	Laranja amarelado
0,587 - 0,597	Laranja
0,597 - 0,617	Laranja avermelhado
0,617 - 0,760	Vermelho

Fonte: Almeida e Menezes (2012)

A REM interage de formas distintas em cada comprimento de onda, dependendo da faixa espectral e do tamanho do objeto imageado. As interações da REM com os objetos da superfície terrestre produzem uma energia de retorno que será captada pelo sensor. Essa energia de retorno é chamada de resposta espectral, nos sensores ela é armazenada como uma representação digital dos valores de radiância.

A energia emitida pelo sol, ou por outras fontes, é conhecida como energia radiante e seu fluxo até atingir uma superfície é chamado de fluxo radiante. Quando o fluxo radiante incide em uma superfície é medido a sua intensidade (W) por metro quadrado (m^2), é conhecido como irradiância.

No entanto, o fluxo de energia, antes de atingir uma superfície sofre interações com alguns elementos da atmosfera, e essas interações compõem os valores de irradiância que atingem a superfície terrestre Jensen (2009) descreve o cálculo da irradiância considerando as interações como a irradiância solar espectral no topo da atmosfera, a transmitância atmosférica, o ângulo zenital solar e a contribuição solar difusa. Portanto, o cálculo da irradiância (E_λ) é realizado de acordo com a fórmula:

$$Eg\lambda = \lambda_1 * \lambda_2 (E0\lambda T\varnothing0 \cos\varnothing0 + Ed\lambda)d\lambda \quad (1)$$

Onde:

E – é a irradiância, $E0\lambda$ irradiância solar espectral no topo da atmosfera, $T\varnothing0$ é a transmitância atmosférica $\varnothing0$ é o ângulo zenital e $Ed\lambda$ contribuição solar difusa. Da mesma forma que ocorre com a irradiância, a radiância, ou seja, o fluxo de energia que retorna a espaço e é captada pelo sensor, sofre novamente alteração ao passar pela atmosfera terrestre. Conforma e a fórmula descrita por Jensen (2009):

$$Lt = \frac{1}{\pi \lambda_1} * \lambda_2 [\rho\lambda T\varnothingv(E0\lambda T\varnothing0 \cos\varnothing0 + Ed\lambda)]d\lambda \quad (2)$$

Onde ρ é a refletância média da superfície do alvo, e π considera o espaço hemisférico

A razão entre a irradiância (energia que chega a um determinado alvo) e a radiância (energia de retorno) dão origem a refletância (figura 2), caracterizada como a quantidade de energia que incide sobre uma superfície e a energia de resposta captada pelo sensor, no mesmo intervalo de tempo (Lira, C. et al., 2016). Se tratando de medidas de densidades de fluxo a razão entre radiância e irradiância se torna adimensional (Almeida e Meneses, 2012) sendo, portanto, a refletância expressa em porcentagem (0 a 100%).

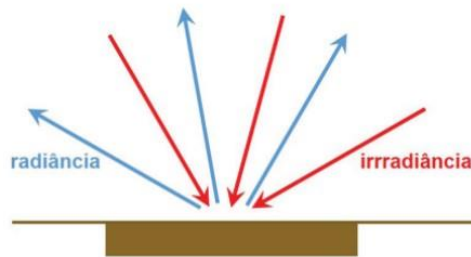


Figura 2: fluxo de radiância emitida e irradiância incidente sobre um objeto.
Fonte: Lira, (2016).

A refletância, portanto, é a energia de resposta dos objetos ao entrarem em contato com a radiação eletromagnética (REM), mas essa energia de retorno sofre alterações dependendo da composição do objeto. Para obter os valores de refletância de uma imagem é necessário converter os valores digitais armazenados para radiância e em seguida calcular a refletância

(Almeida e Meneses, 2012). No processamento digital de imagens essa conversão é realizada durante a correção atmosférica das imagens (equação 3).

$$\text{refletância} = \frac{\text{radiância}}{\text{irradiância}} \quad (3)$$

Os valores digitais das imagens são representados em tons de cinza ou em Números Digitais para armazenamento da informação nas imagens. Quanto maior o nível de energia mais próximo a cor branca o pixel da imagem apresentará, caracterizando maior energia. Portanto, o comportamento do alvo e a resposta que ele emite de energia refletida (refletância) corresponde a sua assinatura espectral (Schowengerdt, 2007).

Almeida e Meneses (2009) abordam que as técnicas de processamento de imagens usam o formato digital, pois os valores digitais são representações bem próximas da refletância no caso de imagens multiespectrais, mas em sensores hiperespectrais é necessário que realize a mudança para valores de refletância.

Portanto, ao realizar a leitura de dados coletados por sensores remotos, é importante o conhecimento prévio das características do sensor e do comportamento dos elementos que se deseja mapear. Há elementos que em determinada faixa do espectral tem a radiação absorvida, nestas faixas esses elementos não apresentam respostas, sendo caracterizado por pixels em preto, já os elementos que apresentam alta refletância são representados por pixels próximos ao branco. Neste contexto o conhecimento prévio do comportamento do alvo indicará qual a faixa do espectro eletromagnético é mais apropriada para ser utilizada na identificação.

A água pura apresenta alta absorção e, portanto, uma baixa resposta espectral em grande parte do espectro eletromagnético, pois a maior parte da energia eletromagnética é absorvida por ela (figura 3). Nas faixas sensíveis a curtos comprimentos de onda na faixa espectral do azul (400 a 500 nm) ou menores, são capazes de captar resposta (Jensen 2009) que gradativamente vai diminuindo à medida que aumenta os comprimentos de onda, apresentando níveis de cinza próximos ao preto.

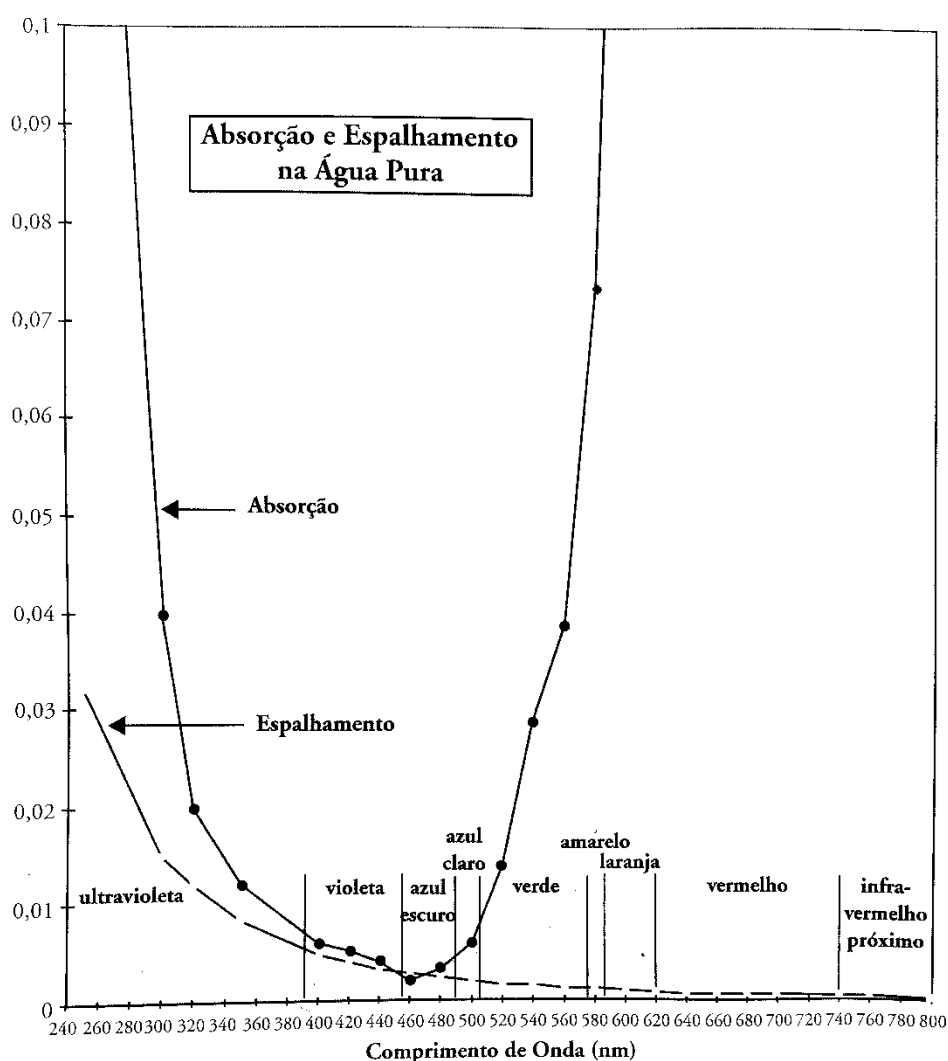


Figura 3: Absorção e espalhamento da água em estado puro
 Fonte: Bukata et al.(1995)

Mas a água presente na superfície terrestre não está em sua forma pura, há vários elementos e materiais, suspensos, dissolvidos, ou sedimentados no leito dos rios e reservatórios. Nas águas de rios a carga de sedimentos tende a ser significativa, além das matérias orgânicas, as algas dão coloração a ela, e há variação desses elementos em locais diferentes e até dentro de um mesmo rio, por estar em constante movimento (Von Sperling, 2007).

Os feixes de luz ao penetrarem na água sofrem absorção ou espalhamento de acordo com a composição dos sólidos em suspensão presentes. Quanto maior for o grau de pureza da água, menor será a turbidez, ou seja, mais transparente se apresentará, devido a maior absorção dos feixes de luz. Atualmente o uso de imagens orbitais se tornou comum entre as diversas

áreas de pesquisas (Jensen, 2009).

As variações dos elementos dissolvidos na água dependem de vários fatores, como a declividade, uso e o tipo de solo, clima e localização, todos esses fatores correlacionados resultam em características particulares em cada curso d'água.

2.2.1 Resoluções Dos Satélites

Na escala orbital, os programas espaciais destinados ao monitoramento da superfície terrestre têm limitações, pois cada sensor é elaborado para suprir o objetivo do programa espacial ao qual pertence, resultando em especificações de resoluções e funcionamento diversos (Schowengerdt, 2007). Este fato influencia na abordagem quando ao uso no monitoramento por imagens de satélites.

Existem dois tipos de sensores, os ativos que emitem sua própria fonte de radiação e coletam informações sobre a interação dos objetos com as ondas eletromagnéticas, e os sensores passivos (figura 4), que utilizam de fontes de radiação externa, neste caso a fonte mais utilizada é o sol. Os sensores dos satélites captam a energia resultante da interação entre a onda eletromagnética emitida pelo sol (no caso de sensores passivos) e o objeto ou elemento da superfície terrestre (também chamado de alvo).



Figura 4: Sensores passivos, que utilizam o sol como fonte de radiação.
Fonte: NASA, 2017 (adaptado)

As capacidades de distinguir e armazenar energia radiante nas diversas faixas do espectro eletromagnético dão origem as bandas dos sensores, cada banda é calibrada para medir a energia de retorno em uma determinada faixa espectral. Tipicamente, os sensores

hiperespectrais possuem maior capacidade de distinção espectral, pois apresentam mais bandas nas diversas faixas espectrais, ao passo que os sensores multiespectrais maior distinção entre objetos, ou seja, maior escala. Devido a grande variedade de sensores a aplicações, eles são classificados por suas resoluções:

a) Resolução Espacial: Refere-se à capacidade do sensor de distinguir tamanho de objetos, ou seja, o detalhamento das imagens. Quanto maior a resolução espacial, menor será o tamanho do pixel da imagem e esse tamanho é o caracteriza essa resolução (Almeida e Meneses, 2012), como por exemplo, um sensor com resolução de 15 metros, significa que cada pixel da imagem tem o tamanho de 15x15 metros, qualquer objeto menor que isso o sensor não é capaz de distinguir, portanto, quanto melhor a resolução espacial, a distinção de alvos será mais precisa. Esta resolução também determina a escala máxima de uma determinada imagem

b) Resolução Espectral: essa resolução refere-se à capacidade do sensor de distinguir objetos de acordo com a intensidade de energia refletida por eles (resposta espectral), quanto menor for a faixa espectral da banda e em maiores quantidades, maior será a capacidade de distinção entre objetos (Almeida e Meneses, 2012).

Se houver objetos distintos, porém, com resposta espectrais próximas, apenas o sensor que possuir bandas diferentes para essas duas respostas será capaz de identifica-las como sendo objetos distintos, caso contrário, se uma banda cobrir a faixa de resposta dos dois objetos, o resultado do imageamento será a mistura desses objetos, e caso, o sensor tem uma banda sensível ao comprimento de onda de apenas um desses objetos e não houver banda que recobre o outro alvo, o último não será identificado. Portanto a acurácia da resolução espectral depende da largura das faixas espectrais e quantidade de bandas.

c) Resolução Radiométrica: essa resolução é definida pelos bits das imagens, que são o formato digital de armazenamento de informação (Jensen, 2009). A intensidade de energia captada pelos sensores é registrada em números Digitais (DN), a cada valor no formato matricial é atribuído um nível de cinza de acordo com a intensidade a energia, de forma que quanto mais próximo ao branco, menor é a energia, ou seja, a refletância do objeto, e quanto mais próximo ao preto maior é a refletância do objeto. Portanto, cada nível de cinza corresponde a uma intensidade de resposta dos objetos. Quanto maior for a capacidade do sensor de distinguir níveis de cinza, melhor a resolução radiométrica.

As imagens de satélite são compostas, portanto, de informações de radiância, que é a intensidade da radiação refletida ou emitida pelo objeto, no entanto, essas imagens em sua maioria são disponibilizadas em formato binário para facilitar a leitura computacional, o que caracteriza a resolução radiométrica das imagens.

Quanto maior a quantidade de bits da imagem, maior é a variação de tonalidade, alterando assim a intensidade de cor da imagem. Uma imagem de 8bits tem 256 níveis de cinza, enquanto uma imagem de 16 bits tem 65536 níveis de cinza. No processamento digital da imagem, pode-se fazer a conversão de números digitais em valores de radiância.

d) **Resolução Temporal:** A resolução temporal diz respeito ao tempo que o satélite gasta para tomar imagens de um mesmo local, ou seja, é o tempo de revisita do satélite. A acurácia da resolução temporal depende do objetivo do mapeamento, por exemplo, para dados atmosféricos de temperatura e movimento de massas de ar, é necessário que o satélite capte informações de uma mesma localidade todos os dias, como é o caso do sensor Modis, já para mapear cobertura vegetal esse tempo de revisita pode ser maior.

A resolução temporal em muitos casos está relacionada com a altitude da órbita e o tamanho da cena que o sensor consegue captar, quanto maior a área mapeada por cena, mais rápido será o tempo de revisita do satélite (tabela 2)

Tabela 2: Resoluções espaciais e espectrais dos sensores Modis, Landsat-8 e Sentinel-2.						
	LandSat-8 16bits		Sentinel-2 12bits		Modis 12bits	
Lançamento	11 de fevereiro de 2013		23 de junho de 2015		04 de maio de 2002	
Órbita	Circular, Heliosíncrone	Altitude: 705 Km	Polar, heliossíncrona	Altitude: 786 km	Polar	Altitude: 700 km
Faixa imageada	185 km		290 km		2330 km	
Resolução temporal	16 dias		10 dias		1 a 2 dias	
Donwload	EarthExplorer		scihub.copernicus.eu		EarthExplorer	
Banda	Comprimento de onda (nm)	Resolução Espacial (m)	Comprimento de onda (nm)	Resolução Espacial (m)	Comprimento de onda (nm)	Resolução Espacial (m)
1	433-453	30	433-453	60	620-670	250
2	450-515	30	457,5-522,5	10	841-876	250
3	525-680	30	542,5-577,5	10	459-479	500
4	630-680	30	650-680	10	545-565	500

5	845-885	30	697,5-712,5	20	1230-1250	500
6	1560-1660	30	732,5-747,5	20	1628-1652	500
7	2100-2300	30	773-793	20	2105-2155	500
8	500-680	15	784,5-899,5	10	405-420	1000
8a			855-875	20		
9	1360-1390	30	935-955	60	438-448	1000
10	10600-11200	100	1365-1395	60	483-493	1000
11	11500-12500	100	1565-1655	20	526-536	1000
12			2100-2280	20	546-556	1000

Fonte: Esa / Nasa (2017)

Mas além do conhecimento das resoluções dos satélites, para o sensoriamento remoto, é necessário também o estudo da assinatura espectral do objeto de interesse, para obter informações sobre quais sensores e quais bandas apresentará resultados mais eficazes.

É possível verificar na tabela que o sensor Modis apresenta resolução espacial de 250 a 1000 metros. Essa resolução temporal inviabiliza estudos em áreas de rios e reservatórios de porte médio e pequeno, como no caso desta pesquisa. No entanto a resolução temporal desse sensor permite captar informações de uma mesma região a cada dois dias. Portanto, essa pesquisa estuda a combinação do sensor Modis com satélites que tem resolução espacial menor, através do processo de fusão de imagens.

O sensor OLI do satélite Landsat-8 é bastante utilizado para estudos da superfície terrestre. Possui resolução espacial de 30 metros e podendo reduzir a 15 metros com a utilização da banda pancromática. Este satélite tem a vantagem de ser continuação de uma serie temporal do programa Landsat, que possui imagens desde a década de 70. Atualmente, com o sensor OLI é possível obter imagens com até 15 metros de resolução espacial e com resolução temporal de 8 dias, quando combinado com o satélite Landsat 7.

O sensor MSI do satélite Sentinel-2a possui bandas de 10, 20 e 60 metros de resolução espacial, nesta pesquisa a faixa espectral a ser utilizada apresenta resolução de 10 metros. A resolução temporal é de 10 dias e a partir de 2017 com o lançamento do Sentinel-2b essa resolução diminui para 5 dias com a utilização dos dois satélites.

As bandas 2 e 3 do Modis abrangem a faixa de 620 a 670 nm (vermelho) e 841 a 876 nm (infravermelho próximo) do espectro eletromagnético, enquanto o sensor OLI as bandas que

correspondem a faixa do espectro eletromagnético mais próximo ao do Modis, são as bandas 4 e 5, na faixa espectral de 640 a 670 nm e 850 a 880 nm, conforme apresentado na tabela 1.

Embora as bandas 2 do Modis e 5 do Landsat abrangem o espectro vermelho e infra vermelho próximo, a largura de duas bandas são diferentes, ao serem comparadas, é possível analisar que elementos que apresentem alta resposta espectral entre 840 a 850 são captadas pela banda 2 do sensor Modis, mas não será identificado na banda 5 do Landsat-8, enquanto elementos com resposta entre 875 a 880 nm serão captadas pela banda 5 do Landsat 8 e não pela banda 2 do Modis.

Somente objetos com resposta entre 850 e 875nm serão captados pelas bandas dos dois sensores. Como as informações de refletância dessa faixa do espectro eletromagnético estarão retratadas em um pixel, não é possível distinguir objetos diferentes que estiverem dentro dessa faixa de resposta espectral. Essa característica é conhecida como a resolução espectral dos sensores.

Outro aspecto importante de ser analisado é com relação ao tamanho do objeto mapeado, como a banda 2 do Modis tem resolução espacial de 250 m este sensor só será capaz de distinguir objetos maiores que 250 metros. Caso o objeto seja menor, a resposta dele se mistura a outros elementos dentro do espaço de 250 metros do pixel.

Neste contexto, o sensor OLI do Landsat apresenta melhores resultados, pois, distingue objetos a partir de 30 metros. Portanto, a utilização das imagens de satélites tem que considerar todos esses aspectos, de acordo com o objetivo do mapeamento, além de conhecer as características dos elementos que se deseja identificar.

As pesquisas sobre a resposta espectral de sólidos suspensos na água, como já citados, apontam para os comprimentos de onda verde e azul a capacidade de apontar quantidades de sólidos suspensos, à medida que as refletâncias nesses comprimentos de onda aumentam, indicam que há maiores quantidades de sólidos dissolvidos na água (Espinoza et al. 2013. Alcântara, et al. 2016, Rostom et al. 2016)

2.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O processamento digital de imagens (PDI) consiste em utilizar técnicas computacionais para aprimoramento das imagens (Marques e Neto, 1999) e extração de informações. Inúmeras

ferramentas computacionais e matemáticas são utilizadas para a aquisição, tratamento e disponibilização de informações captadas por sensores remotos.

Além das técnicas desenvolvidas, de aquisição, modelos matemáticos e softwares de SIG, é necessário conhecer a fonte da informação, neste caso, dos sensores, como, bem como a assinatura espectral dos objetos ou elementos que se deseja extrair de uma imagem.

No entanto, há a fase de pré-processamento das imagens que consiste, segundo Almeida e Meneses (2012) na eliminação de ruídos, correção atmosférica, subtração dos pixels escuros, dentre outros erros e falhas de imageamento que a imagem pode apresentar. No entanto, com o avanço nos sensores de monitoramento terrestre, as imagens são disponibilizadas com a fase de pré-processamento bem adiantadas. As imagens Modis, são disponibilizadas com correção atmosférica, as Landsat e Sentinel, com correção de azimuth, eliminação de ruídos por falha de imageamento e registro (correção geométrica).

2.3.1 Correção Atmosférica

Existem faixas do espectro eletromagnético que são opacas aos efeitos atmosféricos, e por isso não conseguem atingir a superfície terrestre. As faixas espectrais por onde a radiação consegue atingir a superfície terrestre são conhecidas como janelas atmosféricas (Almeida e Meneses, 2012). Já as faixas onde a atmosfera é opaca à radiação, que a impede de atingir a superfície terrestre, são conhecidas como bandas de absorção, essas faixas espectrais não são trabalhadas no sensoriamento remoto quando o sensor é orbital, no caso dos satélites, devido a atmosfera bloquear a REM nessas faixas (figura 5).

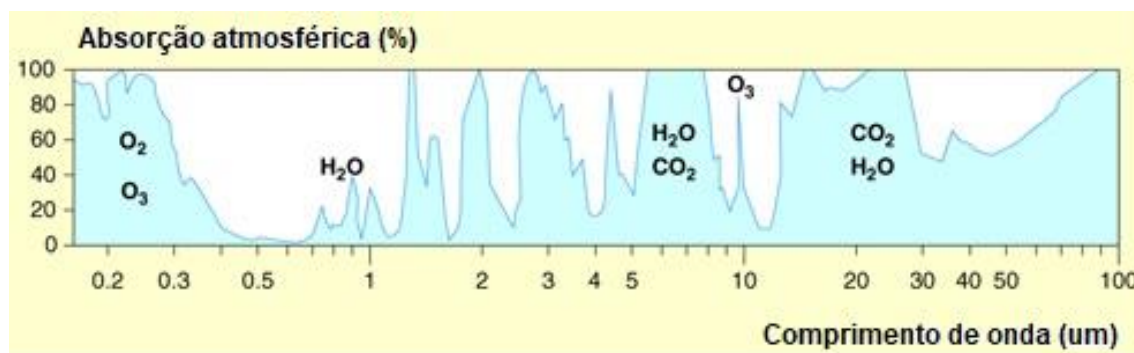


Figura 5: Imagem das janelas atmosféricas, os picos em azul indicam os comprimentos de onda onde a radiação é absorvida por vários gases que compõem a atmosfera.
Fonte: ESA, 2017.

A radiação emitida pelo sol ao entrar em contato com a atmosfera terrestre interage com os gases e material suspenso na atmosfera (figura 6), a interferência atmosférica será maior ou menor dependendo das condições atmosféricas no momento da tomada da cena. Dentre as alterações causadas pela interação da REM com os elementos da superfície terrestre, podem ocorrer os efeitos de dispersão (1), transmissão (2), absorção (3), refração (4), difusão (5) ou emissão (6). Esses efeitos alteram as características da REM (Lira, C. et al, 2016) e ocorrem durante a irradiância da energia do sol na atmosfera e, posteriormente, ao ser captada pelo sensor a energia de resposta também sofre nova distorção da atmosfera (Schowengerdt, 2007) podendo ser efeitos de espalhamento e/ou absorção (1 e 3).

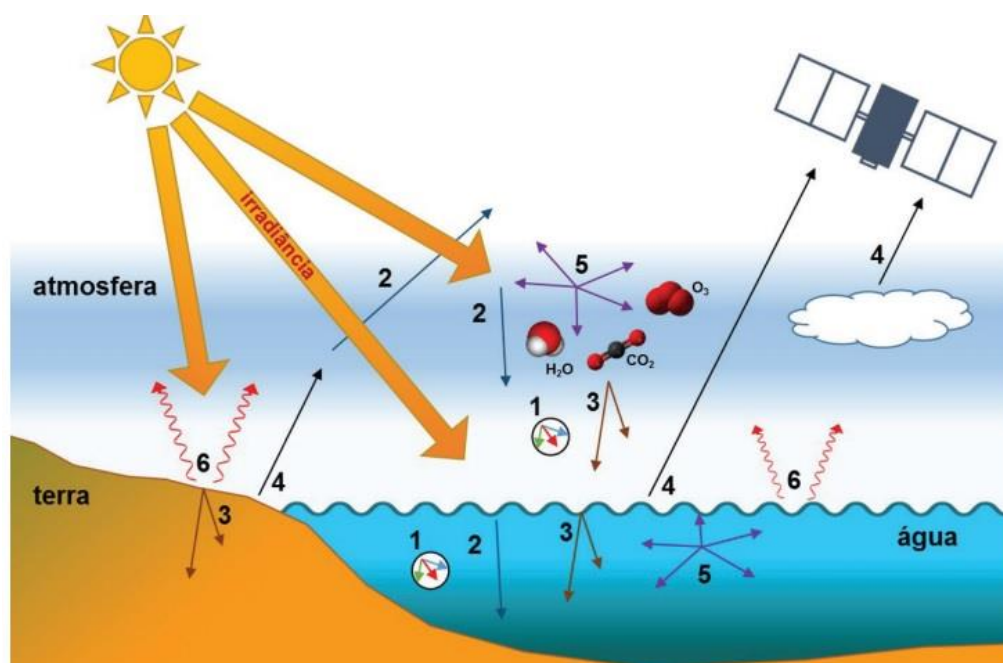


Figura 6: Efeitos sofridos pela radiação ao interagir com os diferentes meios que constituem o planeta. Fonte: Lira, C., Amorim, A., Silva, A. N. 2016

A intensidade dos efeitos atmosféricos na resposta espectral dos alvos depende do comprimento de onda, da data da imagem, da trajetória da radiação (Almeida e Meneses, 2012) e dos fatores climáticos no momento da tomada da cena. A alteração que a atmosfera causa aos sinais captados pelos sensores varia, os gases atmosféricos podem refletir adicionando sinal ao sensor, ou pode absorver radiação, reduzindo a intensidade do sinal que chega ao sensor.

Os efeitos do espalhamento atmosférico podem tornar o alvo opaco, ou reduzir o contraste entre diversos elementos da superfície. Como a atmosfera está em constante movimento, as

respostas espectrais de um mesmo alvo podem variar de imagem para imagem, portanto, para análise temporal de dados, é necessário atenuar esses efeitos de forma a minimizar o espalhamento atmosférico.

Dentre os principais efeitos nas imagens de satélite, a interferência atmosférica pode reduzir a faixa dos valores de DN, redução do contraste dos alvos, dificultando a identificação de objetos distintos, além da alteração no brilho das imagens. Vários métodos são propostos para a redução dos efeitos atmosféricos, no entanto, dados como, data, hora, angulação solar, do momento da tomada da imagem são necessários.

As faixas espectrais são afetadas de formas distintas pela atmosfera (Richards e Jia, 2006), um exemplo são as moléculas de água que interagem mais com a faixa espectral do visível e, à medida que o comprimento de onda aumenta, a influência atmosférica é reduzida.

Dentre as técnicas de correção, Almeida e Meneses (2004) propõem o método de Chávez (1988), conhecido como *Dark Object Subtraction*, ou objeto escuro, que consiste em indicar pixels com valores zero ou próximos a zero, como corpos de água profundos ou sombras de relevo, no entanto, devido ao espalhamento atmosférico, são adicionados brilho aos pixels dessas imagens, e esses valores são subtraídos das bandas. Lira et al. (2016) propõem a correção atmosférica com dados de refletância in situ, para ajuste e calibração da resposta do satélite.

No entanto, nem sempre é possível a tomada de valores de refletância em campo. Schowengerdt (2007) cita em seu trabalho o sistema MODTRANS para ajuste atmosférico, que utiliza dados atmosféricos do momento da tomada das imagens, quando esse procedimento não é possível, o sistema utiliza as informações do metadados das imagens, como dia, hora, angulação solar, para calibração. No entanto todos os autores ressaltam que não há método que remove todos os efeitos atmosféricos, podendo apenas ser minimizados, pois os fatores de distorção são dinâmicos.

Gomes, et al., (2012), comparam os métodos MODTRANS e *Dark Object Subtraction* (DOS), chegaram à conclusão que para as faixas espectrais do visível e IRP, o MODTRANS foi mais eficaz, enquanto que para as faixas do IRM o método *Dark Object Subtraction* demonstrou maior eficiência. Reforçando as pesquisas sobre a variedade de influência da atmosfera nas diversas faixas do espectro eletromagnético, reduzindo a influencia a medida

que os comprimentos de onda aumentam. Devido a este fator a ferramenta FLAASH foi desenvolvida no intuito de corrigir efeitos atmosféricos nas faixas do visível e infravermelho próximo, através das faixas de infravermelho até 3µm (Harris Geospatial, 2017).

O Flaash é projetado para eliminar efeitos atmosféricos causados pela dispersão molecular de partículas na atmosfera, sendo determinado pela seguinte equação (Pinedo-Alvarez, et al. 2018):

$$L_{toa} = \left(\frac{A \rho_{sup}}{1 - \rho_e S} \right) * \left(\frac{B \rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_0 \quad (4)$$

Na equação 4, L_{toa} é a radiância espectral do satélite, ρ_{sup} é a refletância da superfície do pixel, ρ_e é a média da refletância da superfície dos pixels vizinhos, S é o albedo da atmosfera, L_0 é a radiância retroespalhada pela atmosfera e A e B são coeficientes dependente das condições atmosféricas no momento da tomada da cena.

Para a aplicação das imagens dos satélites Modis, Landsat8 e Sentinel 2, na identificação de sólidos totais e turbidez propostos nesta pesquisa, utilizou as bandas do espectro visível (bandas azul, verde e vermelha) e do infra vermelho próximo, portanto, foram aplicados correção atmosférica nas imagens através ferramenta Flaash. Utilizando os arquivos metadados das imagens. Juntamente com o processo de correção atmosférica, as imagens selecionadas foram transformadas de números digitais em radiancia e posteriormente em refletância. Os valores de refletância variam de 0 (sem resposta) a 1 (maxima refletancia)

2.3.2 Correção do azimute de iluminação

Outro fator de distorção presente das imagens de satélite é o azimute de iluminação, que varia de acordo com a posição do satélite em relação ao sol no instante da tomada da imagem (figura 7), o ângulo formado varia de acordo com a programação de órbita de cada programa espacial, horário de tomada da cena e época do ano. Quanto maior for o ângulo do sol com os sensores do satélite mais presença de sombras as imagens apresentam.

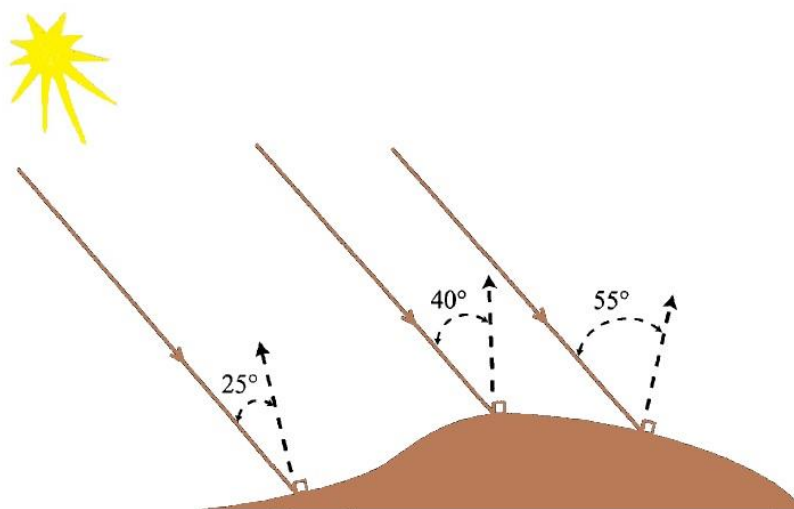


Figura 7: Efeitos da inclinação do alvo na irradiância solar.
Fonte: Schott, 2007.

Portanto, informações de horário de coleta de imagens e data, são informações necessárias para corrigir as sombras das imagens. As sombras impedem a identificação dos elementos que ela recobre. Os relevos acidentados, onde as encostas podem gerar sombras, causando distorção na imagem, por isso os modelos digitais de elevação são utilizados para corrigir essas distorções.

Outro fator de distorção é campo de visão da cena do satélite (FOV), pois quanto maior for, maior será a distorção com relação a efeitos bidirecionais do sol (Qi et al., 1995) como no caso das imagens Modis que recobrem uma área de 2330 km por cena (NASA, 2017), enquanto as imagens Landsat 185km e Sentinel 100km. Portanto, as imagens Modis estão sujeitas a mais erros, tanto de distorção como de ângulo de iluminação. O autor, ao comparar resultados de índices de vegetação, conclui que, em relevos pouco acidentados e os sensores estando em um ângulo zenital em relação ao sol inferior a 40°, o efeito do azimuth de iluminação pode ser desprezado (Qi et al., 1995).

2.3.3 Fusão de Imagem

O processo de fusão de imagens tem como objetivo de melhorar o conhecimento sobre uma determinada cena, há vários tipos de fusão de dados, e as combinações são realizadas de acordo com o tipo de informação que se deseja adquirir. Há fusões de bandas pertencentes ao mesmo satélite, existem fusões de imagens de bandas de satélite diferentes, essas combinações também podem ser realizadas em fontes de informação espaciais diferentes, como imagem de satélite e fotografia aérea, dados de radar ou dados vetoriais.

Para realizar o processo de fusão de imagens é necessário que haja uma correlação radiométrica entre elas. Quando as imagens são pertencentes ao mesmo satélite, como é o caso da fusão da imagem pancromática com as multiespectrais esse processo é mais simples. No entanto quando são imagens de diferentes fontes é necessário fazer os ajustes, para isso existem algumas técnicas de fusão.

Os autores dessa temática, tais como Almeida e Menezes (2012), Jensen (2009), abordam que os processos de fusão de imagens podem ser de domínio espacial, espectral ou operações algébricas. Dentre as técnicas de domínio espacial estão as técnicas transformadas de *Wavelets*, *Low-Pass Filter* (LPF) e técnica de *High-Pass Filter* (HPF), essas técnicas consistem em retirar a informação espacial de alta frequência e alta resolução espacial e combinar com a imagem multispectral.

Para a fusão entre a imagem multiespectral e a pancromática, o Orfeo Monterverdi realiza a remostagem dos pixels das imagens através da técnica de *Low-Pass Filter* (figura 8). Esse procedimento só será satisfatório quando o objetivo for fusionar imagens com a mesma faixa espectral, ou seja, tenha uma correlação, pixels de diferentes tamanhos a ferramenta não consegue remostar (Orfeo, 2017).

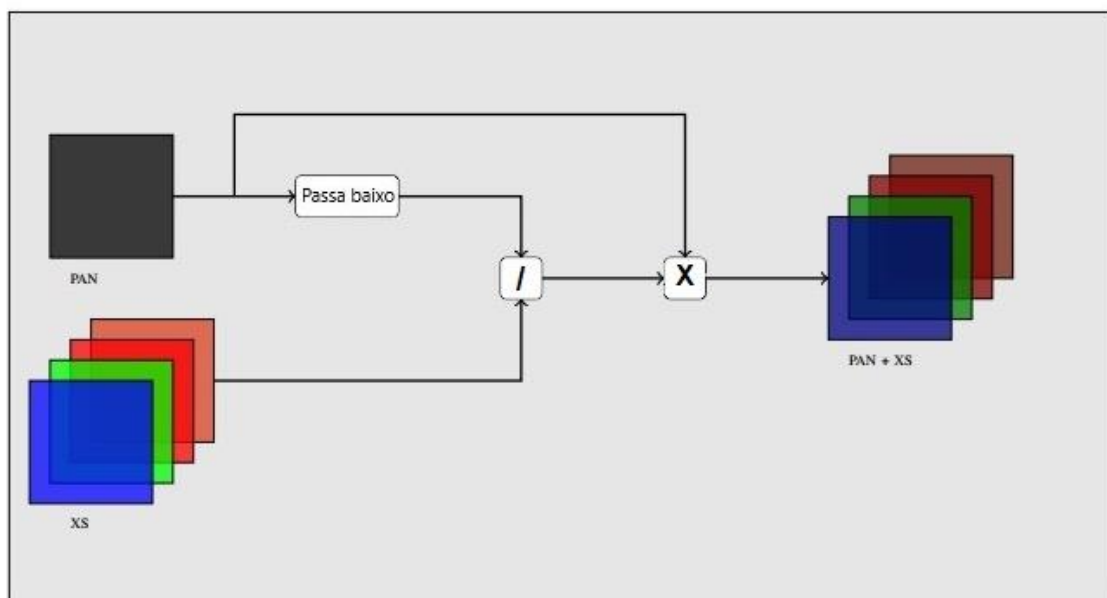
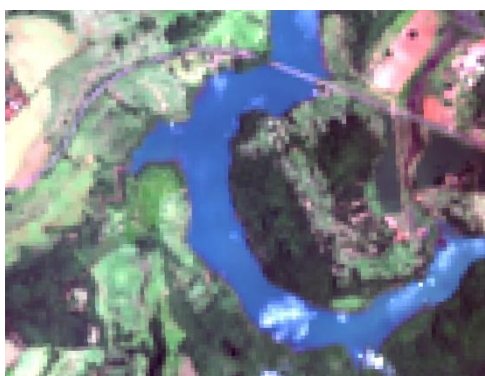


Figura 8: Processo de Fusão de imagem Pancromática com multiespectral no software Orfeo Monteverdi.
Fonte: ORFEO Tool Box Software Guide, 2017.

O Orfeo Monteverdi realiza o processo de fusão com a banda Pan de forma simplificada. Considera que a banda PAN é a soma de todas as bandas multiespectrais, pois são dados

gerados de um mesmo sensor e possuem características semelhantes (data, área imageada entre outras), e para colocar na mesma geometria, o software reamostra as imagens multiespectrais (ORFEO, 2017). De forma que é aplicada a imagem PAN um filtro passa-baixa para que corresponda com os dados de saída das bandas multiespectrais e posteriormente é aplicada o processo de fusão.

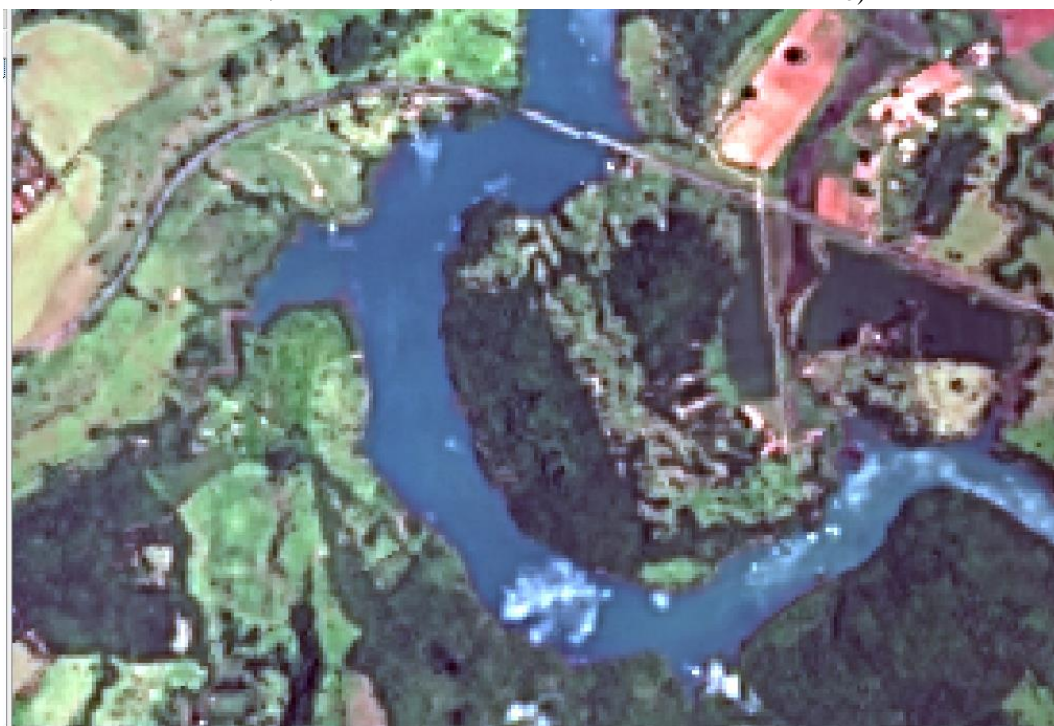
A imagem remostada é fundida com a banda Pancromática, dessa forma a imagem multiespectral adquire geometria da imagem pancromática através de cálculo aritmético linear (figura 9).



a)



b)



c)

Figura 9: Imagem 9a com resolução espacial de 30 metros. Imagem 9b pancromática de 15 metros de resolução espacial. Imagem 9c sintética, derivada do processo de fusão das bandas multiespectrais de 30 metros com a pancromática de 15 metros.

Dentre as técnicas de domínio espectral destacam-se a técnica IHS, Gram Schmidt e Principais Componentes (PC). Já as técnicas de Brovey e multiplicativa (CN) são operações algébricas que usam aritméticas pixel a pixel, o resultado da aplicação de ambas foram próximos.

A técnica IHS é bastante utilizada e consiste em transformar o espaço de cor RGB em Intensidade, matiz e saturação (IHS) (figura 10). O matiz corresponde à cor propriamente dita, a intensidade refere-se ao brilho da imagem, ou seja, a quantidade de luz refletida, e a saturação corresponde a diluição da cor pela luz branca (Moreira, 2011).

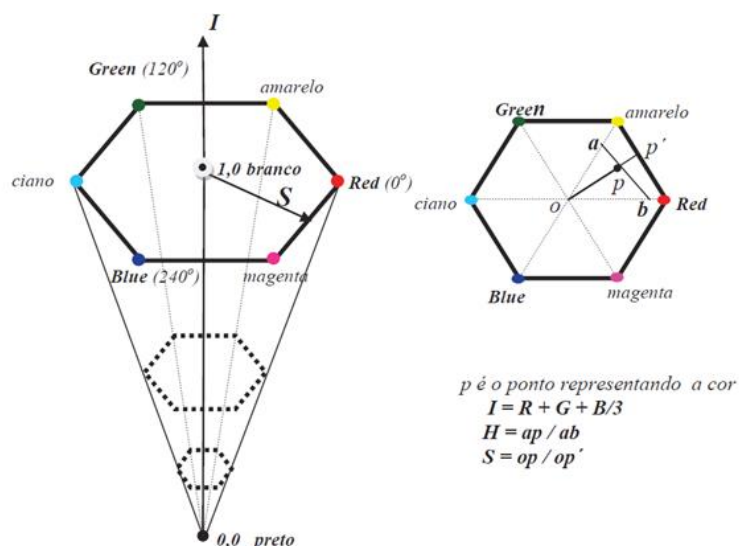


Figura 10: Espaço de cor IHS.
 Fonte: Almeida e Meneses (2012)

A transformação pela técnica IHS consiste em selecionar 3 bandas, como é feita na composição RGB, e a essas bandas associa-se a um elemento IHS, obtém-se dessa forma uma banda de intensidade, outras de matiz e outra de saturação. Por fim a banda intensidade é substituída pela imagem de melhor resolução espacial (Moreira, 2011). Após esse processo a imagem é novamente convertida em RGB, no caso de fusão pancromática, a intensidade é substituída pela banda pan. Portanto, essa técnica apresenta a limitação de utilizar apenas três bandas espectrais.

A técnica de Gram-Schmidt é um método de ortogonalização de um conjunto de vetores em um determinado espaço (figura 11). Para a fusão de imagens essa técnica consiste em simular uma banda Pan a partir das multiespectrais, e essa banda Pan simulada passa a ser considerada a primeira banda, posteriormente essa primeira banda é substituída pela Pan verdadeira, para esse procedimento a banda Pan deve estar no mesmo intervalo que as multiespectrais, ou seja, possuir grande correlação (Almeida e Meneses 2012).

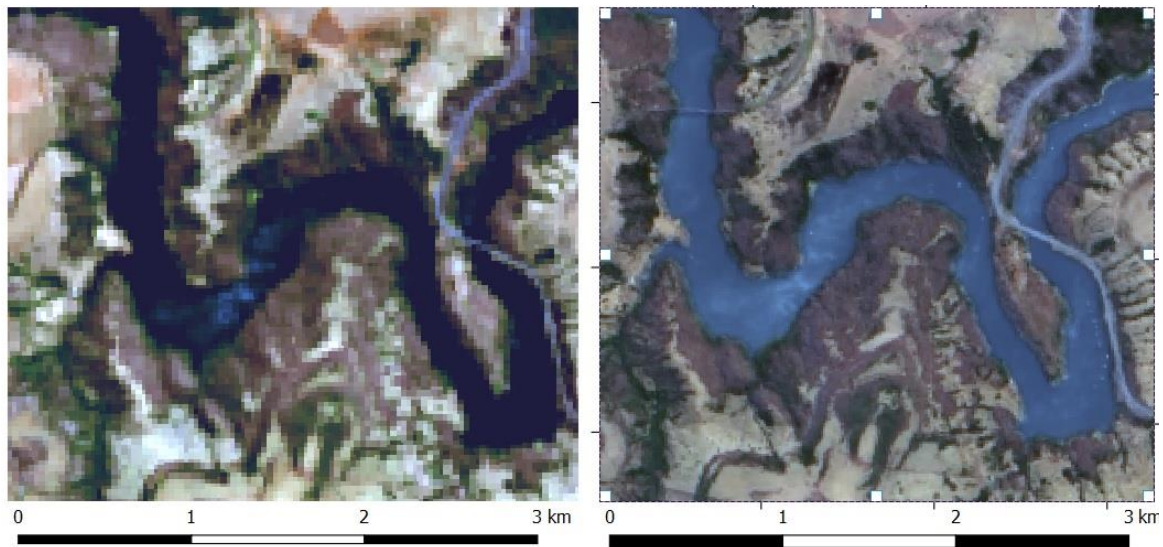


Figura 11: Fusão de imagens utilizando a técnica de Gram Schmidt.

A técnica das Principais Componentes (PC) é um tipo de transformação linear que combina informações espectrais de várias bandas e gera novas imagens com informações mais contrastadas e com menor quantidade de dados (figura 12), esse processo é realizado pixel a pixel (Moreira, 2011). Segundo Schowengerdt (2007), essa transformação é projetada para remover a redundância de informações contidas nas imagens, o autor aborda que essa transformação altera a matriz de covariância, traçando uma matriz diagonal. Esse processo, portanto, visa reduzir a dimensionalidade dos dados em número reduzido de bandas, com pouca perda de informações (Moreira, 2011)

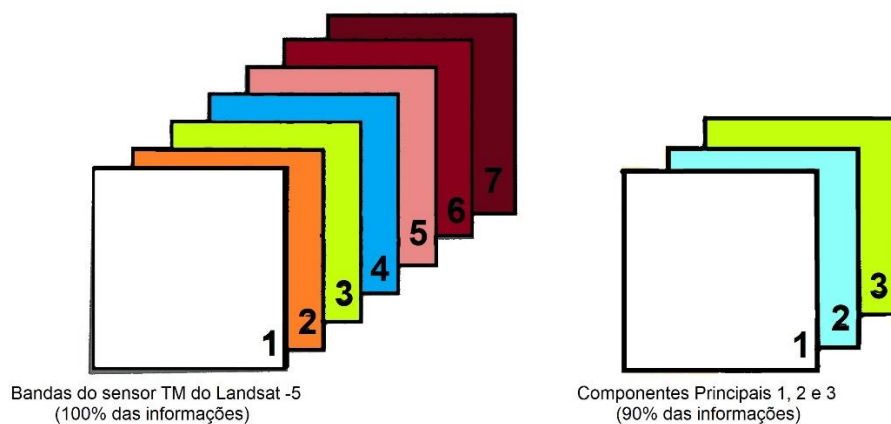


Figura 12: exemplo de uma transformação por Principais Componentes.
Fonte: adaptado de Moreira (2011)

Novo (2008) acrescenta que através da matriz de covariância são traçados os vetores que geram novos canais onde os valores de DN representa a contribuição de todas as bandas daquele eixo (figura 13), o eixo que apresenta maior variância corresponde ao componente principal. Portanto, a transformação das bandas originais em componentes principais é realizada pelo cálculo da matriz de covariância entre as bandas (Novo, 2008), a partir disso é formada novas bandas com valores de DN resultantes da combinação linear de todos os valores das bandas que apresentam covariância próximas (figura 14).

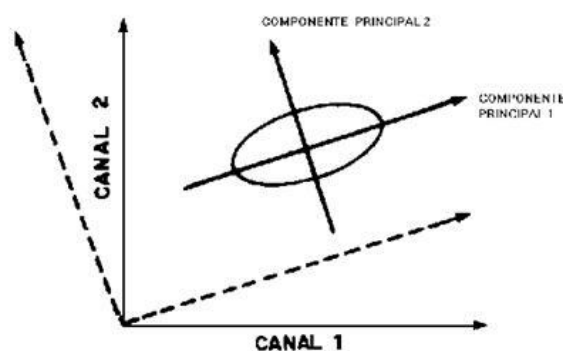


Figura 13: Exemplo de canais gerados a partir dos dados de variância dos vetores.
Fonte: CEPSSRM/UFPR (2017)

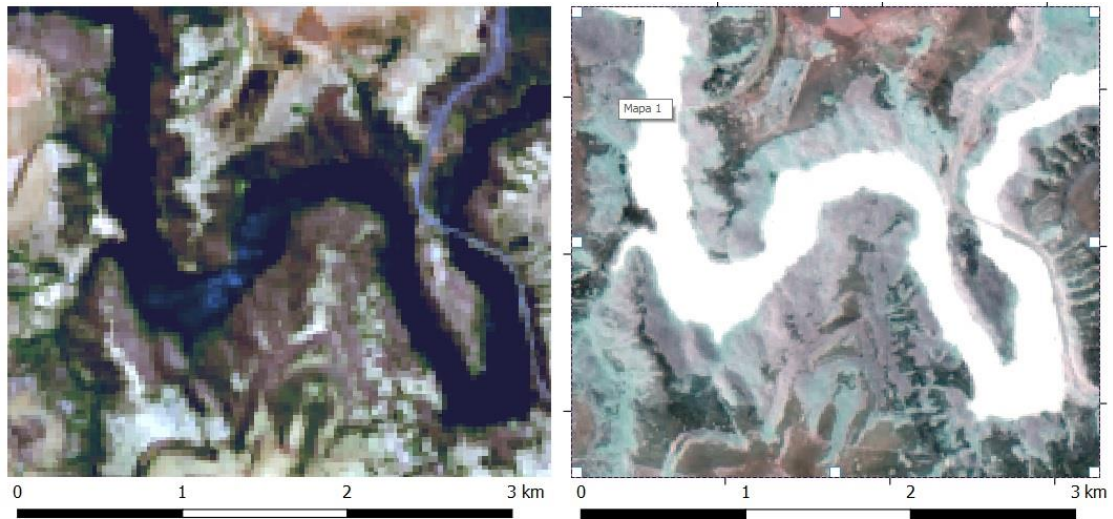


Figura 14: Fusão de imagens utilizando a técnica de Principais Componentes.

Na técnica de Brovey as bandas multiespectrais são multiplicadas pela imagem de alta resolução e divididas pelo somatório das bandas multiespectrais para normalizar a cor da imagem sintética gerada (Almeida e Meneses 2012):

$$Bv = \frac{(msi + 1) * (Pan + 1)}{[\sum(msi * 3) - 1]} \quad (5)$$

Onde:

Msi: Bandas multiespectrais

Pan: imagem de alta resolução espacial (pancromática)

Para se trabalhar na região do infravermelho essa técnica se mostra mais eficiente se comparado a IHS (figura 15).

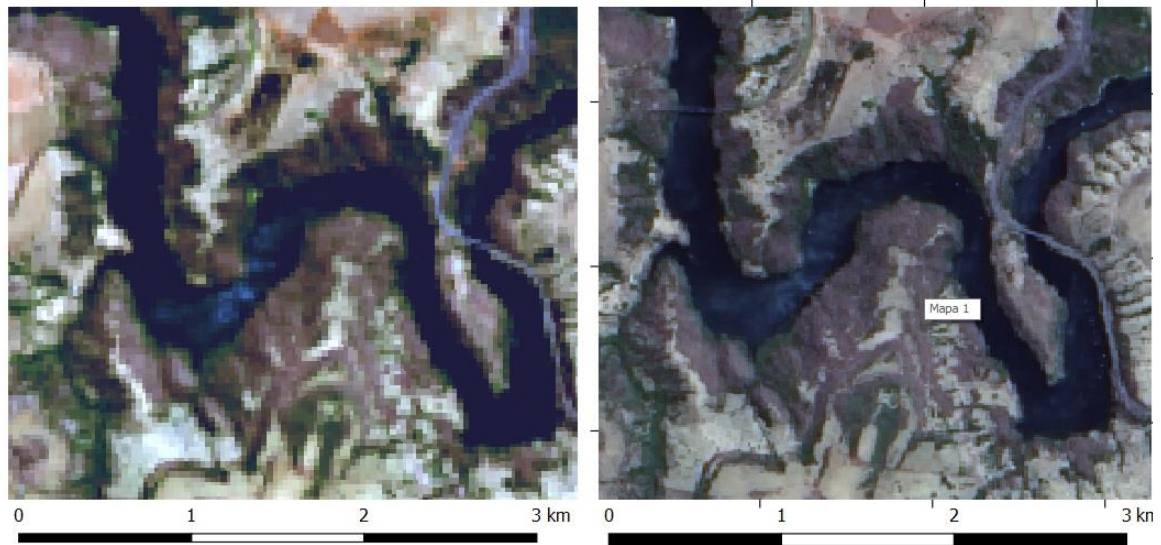


Figura 15: Fusão de imagens utilizando a técnica de Brovey.

A técnica de fusão de imagens multiplicativa (CN) é utilizado para realizar a fusão de imagens com 3 bandas RGB, esse algoritmo pode ser aplicado em fusão de imagens hiperespectrais utilizando sensor multispectrais. A normalização da cor utiliza as bandas de maior resolução espacial para melhorar as imagens de resolução mais baixa, para isso, as faixas espectrais são ajustadas pelo comprimento de onda do centro da banda, e são melhoradas as resoluções somente das faixas que pertencem ao mesmo comprimento de onda. As demais bandas, que não se correlacionam devido pertencer a diferentes comprimentos de onda, permanecem inalteradas (Harris Geospatial, 2017).

Portanto, as bandas que se correlacionam são processadas de forma que cada banda de entrada é multiplicada pela banda da imagem de melhor resolução espacial, depois são normalizadas pela divisão da soma das faixas de entrada (figura 16), conforme a equação:

$$CN = \frac{msi \times pan \times n}{\sum msi + n} \quad (6)$$

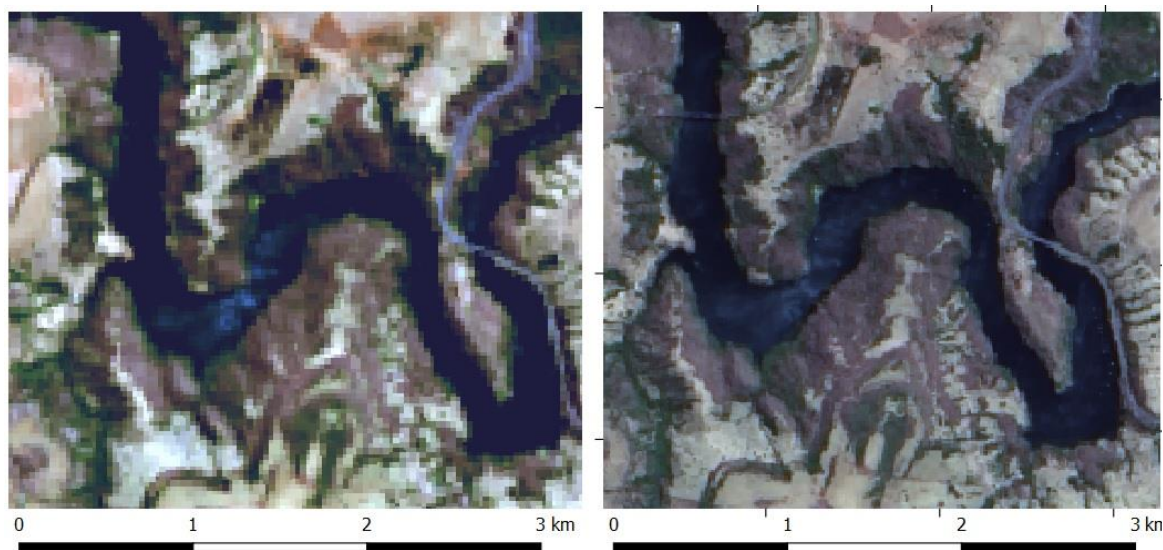


Figura 16: Fusão de imagens utilizando a técnica multiplicativa (CN).

Os demais processos de fusão foram realizados com bandas de diferentes satélites, as bandas 1, 3 e 4 do sensor Modis com resolução de 250 metros serão fusionadas com a banda Pan do Landsat 8 de 30 metros de resolução. No entanto, essas bandas possuem larguras diferentes. Para a fusão de bandas de diferentes sensores foi utilizada a técnica das Gram Schmidt, por apresentar melhores resultados na manutenção dos valores de refletância das bandas.

O processo de fusão foi realizado a fim de verificar a eficácia dos métodos, no auxílio da fotointerpretação das imagens, e a aplicabilidade em de diferentes satélites, resultando assim, a utilização das melhores características de cada um deles, obtendo maior flexibilidade na utilização de dados de sensoriamento remoto por sensores orbitais.

2.4 SENSORIAMENTO REMOTO EM RECURSOS HÍDRICOS

Devido a facilidade de obter dados simultâneos de grandes extensões, aliados ao desenvolvimento tecnológico e espacial, as técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo estudada para aplicação em águas interiores. Em águas oceânicas e atmosféricas há alguns programas espaciais desenvolvidos para este fim, como o satélite Aqua e Terra. Além de muitas pesquisas no intuito de identificar partículas presentes em corpos d'água.

Ponto comum às pesquisas sobre o monitoramento de águas interiores por sensores de satélite, realizadas até o momento, utilizaram de medições *in situ* de refletância, ou seja, refletância de superfície, a fim de eliminar influencias atmosféricas e ajustar os valores

medidos pelos sensores orbitais (NICHOL e NAZEER, 2016. JAFAR-SIDIK *et al.*, 2017. ZHANG *et al.*, 2017.)

Woźniak *et al.* (2016), após pesquisa para verificar a resposta espectral das partículas em suspensão e do carbono orgânico nas águas do mar Báltico, obteve que para as partículas em suspensão quando analisadas em bandas simples os valores de 625 e 710nm da faixa do espectro eletromagnético apresentam melhores respostas. A relação das frequências que apresentaram melhores respostas foram 490/589nm e 490/625nm. Os autores realizaram medidas de refletância em campo e compararam com as amostras das partículas e carbono orgânico presente na água.

Rostom, Shalaby, Issa e Afifi (2016), após estudo de detecção remota no lago Mariut, desenvolveram modelos preditivos para identificação de contaminação por metais pesados na água. Apesar do objetivo da referida pesquisa ser a detecção de metais pesados, os resultados obtidos por eles indicaram que o comprimento de onda de 582-653nm relaciona o comportamento espectral da concentração de clorofila, concluíram também que a medida que a concentração de sedimentos em suspensão aumenta a refletância também aumenta nos comprimentos de onda de 400 e 580nm.

A utilização de imagens de satélite torna-se cada vez mais acessível, e a crescente demanda tem impulsionado esse setor a desenvolver e melhorar essa tecnologia. No estudo de águas oceânicas, os sensores não demandavam alta resolução espacial, já no estudo de águas interiores essa resolução é de grande importância.

Além do mais, o estudo das águas interiores são opticamente mais complexas devido à alta concentração de biomassa de fito plâncton, partículas minerais, detritos e são altamente variáveis, além de demandar melhor resolução espacial dos sensores remotos (Hunter, Kutser e Palmer, 2014).

Diante desse contexto, vários autores têm estudado modelos para medir os parâmetros da água por sensoriamento remoto (Alcântara *et al.* 2015; Abdelmalik, 2016; Robert *et al.* 2016; Burska *et al.* 2016). Embora o histórico do sensoriamento remoto revele pesquisas que se dedicam a estudar as águas por sensores embarcados, os focos, em sua maioria, são voltados para os oceanos. Por isso são necessárias pesquisas do uso dessa tecnologia no estudo de

águas interiores, contudo, os estudos realizados em águas oceânicas são suporte para essas novas pesquisas.

El-Zeiny e El-Kafrawy (2016) analisaram através das imagens multiespectrais do satélite Landsat 8, a poluição no lago Burullus no Egito. Aplicaram à imagem três modelos matemáticos (desenvolvidos por Wang e Ma, 2011), um para análise do DBO, outro para o nitrogênio total e o último para o fósforo total. Esses parâmetros analisados, quando encontrados em altas quantidades indicam níveis de poluição. O objetivo da pesquisa era verificar a potencialidade em usar o sensoriamento remoto e técnicas de SIG para detectar áreas mais vulneráveis à poluição no lago Burullus, e chegaram à conclusão que as atividades humanas afetam diretamente a qualidade da água no lago. Os autores elaboraram uma matriz de correlação entre os valores de refletância em vários comprimentos de onda captados em superfície e os parâmetros de qualidade da água (DBO, fosforo e nitrogênio) a fim de relacionar as medidas de qualidade de água coletados e a radiância nas várias bandas do sensor OLI. Posteriormente foram utilizadas técnicas de regressão nas leituras das bandas individuais com os parâmetros da qualidade da água (El-Zeiny e El-Kafrawy, 2016). Ajustaram a equação desenvolvida por Wang e Ma (2001), do sensor TM para o OLI, alterando as bandas correspondentes aos comprimentos de onda:

$$TP = \frac{1}{4} e \left(0.4081 - 8.659 + \ln \left(\frac{B3}{B2} \right) \right) \quad (7)$$

$$TN = \frac{1}{4} e \left(8.228 - 2.713 + \ln (B2 + B3) \right) \quad (8)$$

$$BOD = \frac{1}{4} e \left(4.2380 + 2.2546 + \ln \left(\frac{B2 - B3}{B2} \right) \right) \quad (9)$$

Onde B2 é a banda correspondente à faixa do espectro azul (450 – 515 nm) e B3 é banda da faixa do espectro verde (525 – 680 nm) do satélite LandSat 8. Os resultados mostraram uma correlação significativa dos parâmetros da água analisados com as bandas 2 e 3 do sensor OLI.

Espinoza *et al.* (2013), realizaram o estudo de águas interiores, a partir do rio Madeira, utilizando as imagens de 250 metros de resolução espacial do sensor MODIS, eles analisaram as frequências de 645 e 858,5nm para estimar a concentração de sedimentos em suspensão, comparando as medidas feitas em campo com imagens MODIS de vários períodos em um total de onze anos. Esses autores criaram um modelo de refletância de recuperação utilizando as bandas do vermelho e infravermelho, e chegaram aos resultados que a refletância está diretamente relacionado com o total de concentração de sedimentos em suspensão. Quanto mais sedimentos a água possui menor será a refletância nas bandas do azul e verde, apresentando altos valores nos comprimentos de onda de 560 e 705nm decaindo em seguida. Portanto as faixas do verde e azul correspondem a absorção da luz pelos sedimentos. E na faixa do comprimento de onda vermelho os sedimentos em suspensão controlam a dispersão e absorção da luz.

Robert *et al.* (2016), realizaram um trabalho semelhante ao de Espinoza *et al.* (2013), utilizando o mesmo sensor Modis para monitorar a turbidez e o total de sedimentos em suspensão, neste caso no reservatório de Bagre na Burkina Faso. Confirmando o trabalho anterior concluiu que as bandas na faixa do vermelho e infravermelho próximo, medidas por espectrorradiômetro em superfície, são as mais adequadas para monitorar a turbidez e os sólidos suspensos (tabela 3). Esta pesquisa ainda demonstrou que ao longo de quinze anos a quantidade total de sólidos suspensos aumentou gradativamente o que, hipoteticamente, foi explicado pela evolução do uso do solo na região.

Tabela 3: Correlação entre as respostas espectrais das bandas do sensor Modis e dados do espectro radiômetro.

R² para várias bandas e relações de banda (refletância de espectroradiometria de campo convolvida para combinar bandas radiométrica MODIS, ou banda MODIS a partir de dados diários). Os números em negrito indicam o R² mais alto

Banda ou Relação de bandas	R ² : dados de espectroradiometria de campo (convolvidos para corresponder as bandas Modis) versus SSSC	R ² : dados de espectroradiometria de campo (convolvidos para corresponder as bandas modis) versus turbidez	Dados Modis (diariamente) versus SSSC	Dados Modis (diariamente) versus turbidez
R	0,2	0,26	0,07	0,12
NIR	0,97	0,98	0,4	0,47
NIR/R	0,98	0,99	0,71	0,89
R-NIR	0,73	0,77	0,56	0,63
R-NIR/R+NIR	valores negativos	valores negativos	0,69	0,62

Fonte: Adaptado Robert et al. (2016)

Alcântara *et al.* (2016) pesquisaram esta mesma temática em um reservatório utilizando o sensor OLI do satélite Landsat-8, para estimar o total de matéria em suspensão total, chegaram aos resultados que quanto maior a resposta espectral no comprimento de onda maior, representa menor concentração de matéria em suspensão, as bandas correspondentes ao vermelho e infravermelho não estimam a concentração de sólidos em suspensão, pois podem ser mascaradas pela absorção da matéria orgânica colorida. Concluíram que as bandas 2 e 3 (azul e verde) do sensor OLI são eficientes para estimar matéria em suspensão.

Ao aplicar as técnicas de sensoriamento remoto em reservatórios de acumulação, é necessário conhecer o comportamento espectral da água, e a área do entorno para identificar a origem dos elementos que estão presentes nesse reservatório. Como analisado na Figura 4, a água tem baixa resposta espectral devido a sua transparência e elevada absorção, sendo captada apenas nas bandas verde e azul do espectro eletromagnético. No entanto se houver sólidos suspensos, há aumento da turbidez e, consequentemente, redução da transparência e diminui o poder de absorção da radiação eletromagnética, resultando em uma maior refletância nessa faixa do espectro (Figura 17).

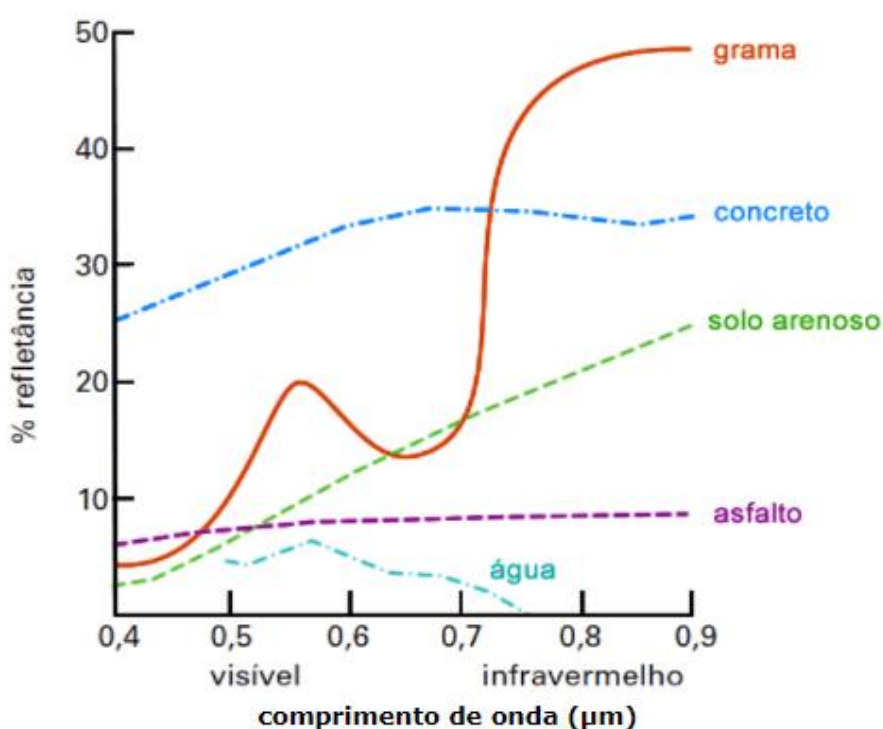


Figura 17: Curvas espectrais de refletância para alguns elementos. Fonte: D'Arco (2011).

A quantidade de sólidos presentes no reservatório altera a resposta espectral da água, como nas bandas do azul e verde, onde a água em estado puro absorve mais radiação. Os sólidos influenciarão a reduzir a absorção nessas faixas espectrais, e nas bandas do vermelho e infravermelho onde o solo tem maior resposta (Espinoza et al. 2012) e água se apresenta como um corpo negro (sem resposta) pode apresentar respostas significativas.

A utilização das bandas 2 e 3 (azul e verde) do Satélite Sentinel, que são bem próximas ao intervalo de captação das bandas 2 e 3 do Landsat 8 (gráfico 1), foram para verificar se há maior acurácia nos resultados referentes aos sólidos em suspensão, com sensores com 10 metros de resolução espacial. Pois, nessa faixa espectral, correspondente ao azul e verde, no Landsat 8 a resolução espacial é de 30 metros.

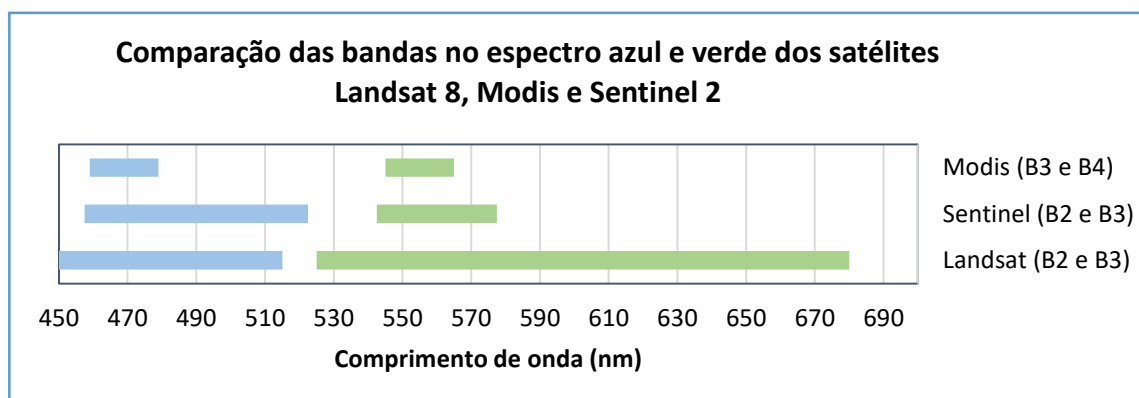


Gráfico 1: Comparação das faixas espectrais azul e verde dos satélites Modis, Landsat 8 e Sentinel 2.

A faixa espectral correspondente aos comprimentos de onda do verde e azul do sensor Modis refere-se às bandas 3 e 4, estes, possuem resolução espacial de 500 metros, por esta razão a faixa espectral desse satélite não será utilizada. Embora, conforme é possível visualizar no gráfico 1 essa faixa espectral deste sensor é mais estreita, comparados ao Modis e Sentinel.

A água apresenta resposta espectral mais significativa nas bandas azul e verde, ao utilizar as bandas vermelha e infravermelha, a água em seu estado puro não apresentará respostas, ficando valores de refletância próximos a zero, pois essas bandas absorvem praticamente todo o fluxo radiante incidente (Jensen, 2009 p.415), o que significa que em uma imagem onde os corpos d'água apresentem valores significativos de refletância nessas bandas, há presença de materiais dissolvidos ou suspensos na água.

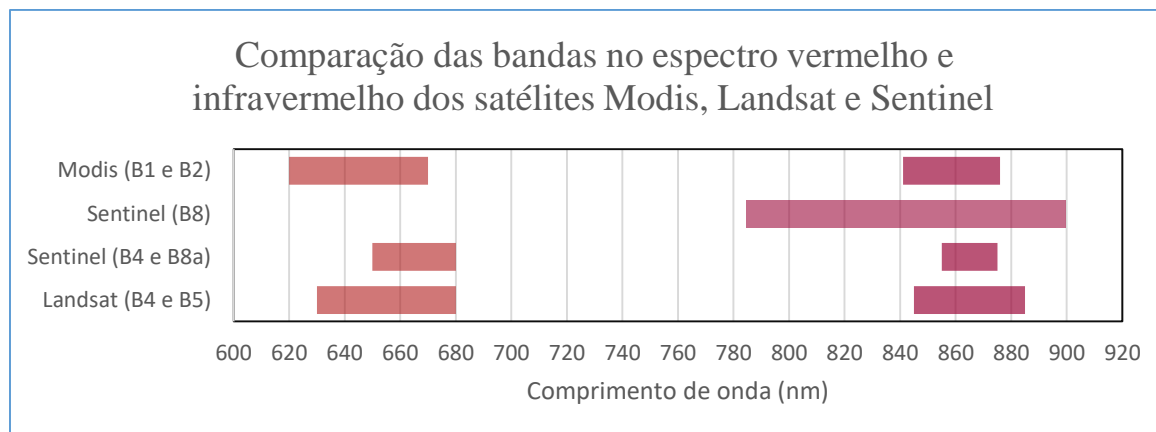


Gráfico 2: Comparação das faixas espectrais vermelho e infravermelho dos satélites Modis, Landsat 8 e Sentinel 2.

No gráfico 2 é possível verificar que a largura da faixa espectral do sensor Modis não difere significativamente dos sensores dos demais satélites. Dessa forma, a principal vantagem do sensor Modis é ter uma maior resolução temporal. Portanto as bandas do vermelho e infravermelho próximo são propícias para estudar os sólidos presentes nos reservatórios. Em razão disso, será utilizado as bandas 1 e 2 do sensor Modis.

As imagens Landsat, Modis e Sentinel, foram coletadas em datas próximas às coletas de água. Apesar dessas imagens, com disponibilização gratuita, terem a limitação de não poderem ser programadas para uma data específica, é possível, através da resolução temporal, prever um intervalo de dias em que o satélite irá captar imagens da região desejada, como ocorreu na coleta do dia 29 de novembro, onde a imagem Landsat captou imagens dos reservatórios Amador Aguiar I e II neste mesmo dia. A resolução temporal e a impossibilidade de programação de datas para a aquisição de imagens resultam em uma dificuldade em utilizar imagens de diferentes satélites. Outros aspectos a considerar na utilização dessas imagens são a presença de nuvens, pois as bandas utilizadas são opacas a elas.

2.5 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA

Quando um experimento é realizado e repetido sob as mesmas condições, os resultados obtidos não são idênticos, essa variação que ocorre de uma medida para outra é chamada de erro experimental, e ele pode ser de origem sistemática, quando ocorre devido à falta de ajustes de equipamentos e procedimentos incorretos, e os erros estatísticos, que são as incertezas das medidas, causadas por variações incontroláveis e aleatórias. Portanto, é

indispensável a análise estatística de experimentos, para verificar se os dados são estatisticamente confiáveis.

Para verificar se as médias entre os grupos de valores são iguais ou tem diferenças é realizado a análise de variância (ANOVA) que é aplicada quando há necessidade de comparar um tratamento (one way), cada resposta observada no tratamento é uma variável aleatória (MONTGOMERY, 2012), os diferentes métodos utilizados e comparados são chamados de fator. Portanto, a anova é aplicada para medir a variabilidade para todas as observações obtida pela variância amostral de N observações, conforme mostra a tabela 4:

Tabela 4: Experimentos de fator único com teste de Anova - *one way*.

Dados Típicos para um Experimento de Fator Único							
tratamento	observações					total	Medias
1	y1.1	y1.2	y1.3	...	y1.n	y1	\bar{Y}_1
2	y2.1	y2.2	y2.3	...	y2.n	y2	\bar{Y}_2
3	y3.1	y3.2	y3.3	...	y3.n	y3	\bar{Y}_3
4	y4.1	y4.2	y4.3	...	y4.n	y4	\bar{Y}_4
.
.
.
α	y α .1	y α .2	y α .3	...	y α n	yn	\bar{Y}_n

Fonte: Montgomery, 2012 (adaptado)

Através da tabela da ANOVA é possível analisar a variabilidade entre tratamentos diferentes e dentro de um mesmo tratamento. Verificando se há diferenças entre as médias nas observações e entre os tratamentos.

A análise da variância com mais de um tratamento se baseia na decomposição de variável de resposta em relação aos tratamentos (variância entre os tratamentos) e o erro experimental (variância dentro do tratamento), essa análise é realizada através da soma dos quadrados.

Tabela 5:

Tabela 5: Modelo de tabela da Anova

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	Valor F	Valor P
Tratamento	Vt = K-1	SQT	QMT	F	ρ
Resíduo	Vr = n-1	SQR	QMR		
Total	N-1	SQtotal	QMtotal		

$$N = \sum_{t=1}^k nt \quad (10)$$

Onde nt é o número de observações dentro de cada tratamento, k é o número de tratamentos V_t é o número de graus de liberdade entre tratamento, e V_r o grau de liberdade entre tratamentos.

$$QMT = \frac{SQ_{trat}}{V_t} \quad (11)$$

$$QMR = \frac{SQR}{V_r} \quad (12)$$

$$SQR = SQT - SQ_{total} \quad (13)$$

$$SQT = \sum_{i=1}^{nt} (Y_{ti} - \bar{Y}_t)^2 \quad (14)$$

\bar{Y}_t média geral para todos os tratamentos, Y_{ti} = Valor da observação no tratamento.

Trata-se, portanto, da decomposição das variâncias analisadas dentro de cada tratamento através do quadrado médio dos resíduos (QMR) e entre os tratamentos diferentes, que é a diferença de médias, calculadas pelo quadrado médio dos tratamentos (QMT) (Anjos,2005) Cada observação dentro de um experimento (ANOVA One Way) pode ser decomposta de acordo com a fórmula 11 (MONTGOMERY, 2012):

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (15)$$

Onde:

Y_{ij} é a observação de os tratamentos em as unidades experimentais ou parcela; μ é a média geral, τ_i é o efeito do tratamento; ε_{ij} é o erro associado aos tratamentos em todas as unidades experimentais ou parcela.

A análise da variância é aplicada para verificar duas hipóteses sendo H_0 , também chamada de hipótese de nulidade, quando as médias dos tratamentos são iguais, ou seja, não houve diferenças significativas entre as elas. E H_1 , ou hipótese alternativa, quando as médias dos tratamentos são diferentes. Para verificar qual das duas hipóteses é verdadeira é realizado o teste F:

$$F = \frac{QMT}{QMR} \quad (16)$$

Se o valor de F calculado for pequeno H_0 é a hipótese aceita, caso contrário, se o valor de F for alto H_0 é rejeitado, portanto, H_1 é a hipótese aceita. O valor de F é calculado na tabela da Anova, e comparado ao valor da tabela F de Fisher, analisada de acordo com os graus de liberdade da anova. Portanto, se $F_{calculado} > F_{tabelado}$ rejeita-se a hipótese nula (H_0). O valor de p também é utilizado para avaliar a significância, se $p < \alpha$ rejeita-se a hipótese nula (H_0).

No entanto, quando a hipótese alternativa é aceita, indicando que há diferenças entre as médias, é necessário conhecer qual ou quais médias são diferentes, para isso é aplicado o teste de Tukey, existem outros métodos comparativos, mas este, é confiável e de fácil aplicação. Através dele os valores são comparados dois a dois e estabelecido um intervalo de confiança de $1-\alpha$, a partir dessa relação as médias são agrupadas de acordo com a semelhança entre elas.

3 MATERIAIS

3.1 ÁREAS DE ESTUDO

Os reservatórios Amador Aguiar I e II foram construídos para operação das usinas hidrelétricas Amador Aguiar I e II, concluídas no ano de 2006, estão localizados no baixo curso da bacia do Rio Araguari no Estado de Minas Gerais, Brasil. Os reservatórios Amador Aguiar I e II se localizam na divisa dos municípios mineiros de Uberlândia e Araguari e uma pequena parte no município de Indianópolis (Figura 18). Segundo dados do Consorcio Capim Branco (2017) o reservatório Amador Aguiar I compreende uma área de inundação de 18,66 km² e o Amador Aguiar II 45,11 km² inundados. As usinas hidrelétricas são do tipo fio d'água, com potência de 240 e 210 MW respectivamente.

A região é caracterizada por apresentar relevo entalhado conhecido como vale do rio Araguari, classificada por Baccaro (1991) como unidade geomorfológica do Canyon do Araguari. A geomorfologia da região faz parte da unidade morfoestrutural da bacia Sedimentar do Paraná, do qual é afluente, abrangendo os arenitos da Formação Botucatu,

basaltos da Formação Serra Geral e rochas do grupo Bauru (NISHIYAMA, 1989). Segundo Carrijo (2003) os afloramentos rochosos e depósitos fluviais são características singulares do vale do Araguari, que trazem informações sobre as gênesis da região.

Essas características físicas do relevo possibilitou a construção de um sistema de reservatórios com menor custo com barragem e área alagada, portanto, o tipo de relevo tornou-se propício para a construção de hidrelétricas, apresentando assim, um grande potencial energético (Carrijo, 2003). Atualmente o Rio Araguari apresenta um sistema de reservatório em cascata, iniciando com o reservatório de nova ponte, seguido pelo Miranda e por fim, pelo reservatório Amador Aguiar I e II.

O rio Araguari é um importante afluente da bacia hidrográfica do Paraná. Nasce na serra da Canastra, em uma altitude de 1300 metros, e atravessa a região do Triângulo Mineiro (Figura 18). Compreende uma área de 22.091 km² com uma extensão total de 475km e atende mais de 1 milhão de pessoas e deságua no rio Paranaíba entre os municípios de Araguari e Tupaciguara, na divisa com o Estado de Goiás (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, 2017).

A região é de domínio do bioma cerrado, um tipo de savana considerada de grande diversidade (Ab'Saber, 2003). Caracterizada por possuir duas estações bem definidas ao longo do ano, sendo o verão chuvoso e o inverno seco. Apesar de apresentar umidade baixa e vegetação preparada para longos períodos de estiagem, no cerrado encontra-se grande parte das nascentes das principais bacias hidrográficas da América do Sul, tais como a do São Francisco, do Paraná, do Tocantins/Araguaia, Rio Xingu, além de ser uma região de captação de água que mantém o aquífero Guarani, importante reserva de água subterrânea.

Este bioma a partir da década de setenta, passou a despertar interesse do agronegócio e tornou-se a nova fronteira agrícola do país, predomina, portanto, grandes monoculturas que demandam recursos hídricos gerando maiores conflitos de interesse pela água, expondo a deficiente gestão dos recursos hídricos.

Localização da Área de Estudo

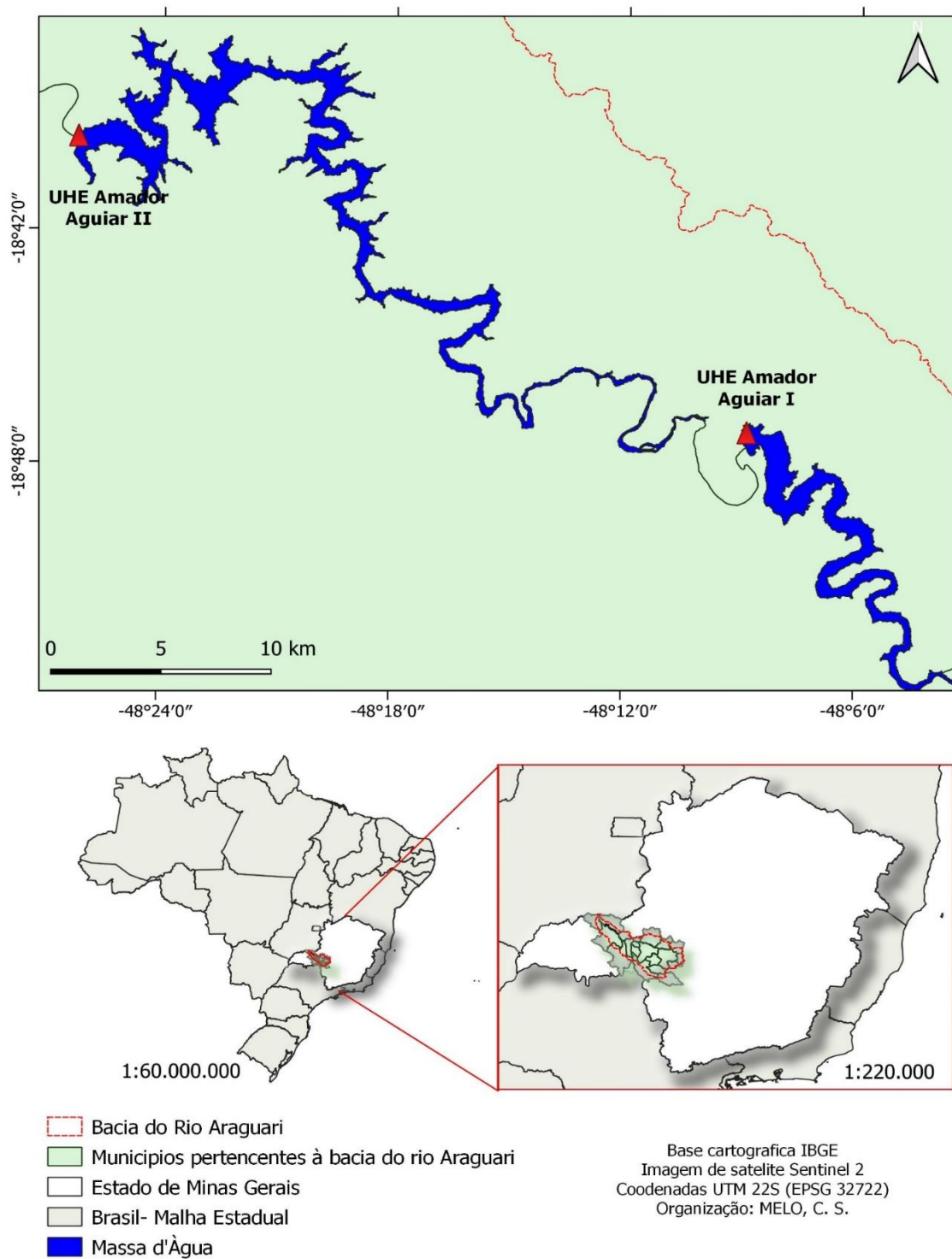


Imagem18: Localização da Área de Estudo

A lei municipal Nº 455 de 27 de setembro de 2007 dispõe sobre o zoneamento ambiental e o uso dos reservatórios das UHE's Amador Aguiar I e II, segundo este documento os usos potenciais dos reservatórios são destinados à: Irrigação de culturas de subsistência, dessedentação animal, consumo, lazer, esporte, pesca amadora, criação de peixes, navegação para transporte, para turismo e para lazer, e por último, para controle de cheias e vazão a jusante (Lei complementar nº455/2007).

A responsabilidade do monitoramento dos reservatórios em estudo é do Consorcio Capim Branco de Energia (CCBE), grupo que administra as hidrelétricas Amador Aguiar I e II. A coleta de água é realizada e enviada para laboratórios realizarem a análise por solicitação da CCBE. São analisados os parâmetros de oxigênio dissolvido, coliformes fecais, Ph, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio total, fosfato total, temperatura, turbidez e sólidos totais (CCBE, 2017).

O IGAM monitora, no rio Araguari, quatro pontos com dados analisados duas vezes ao ano (<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br>), por estações fixas. Fato que demonstra que são poucas estações cobrindo grandes áreas e baixa periodicidade das amostras. No caso de reservatórios, o monitoramento da qualidade de água é de responsabilidade da instituição que solicitou a outorga, sendo, em grande parte dos casos, administrada por empresas privadas com interesses próprios. Outro problema nessa descentralização do monitoramento da qualidade da água é a falta de integração e atualização dos dados.

3.2 AJUSTES NAS IMAGENS

As imagens dos satélites Landsat-8, sensor OLI, são amplamente utilizadas no estudo da superfície terrestre, apesar de possuírem resolução espacial de 30 metros, há uma banda pancromática de 15 metros, facilitando dessa forma a utilização de suas imagens com 15 metros de resolução espacial, através da técnica de fusão de imagens. Portanto essa pesquisa utilizou as técnicas e fusão com as imagens do Landsat 8 de 15 metros de resolução espacial (pancromática).

Outro sensor utilizado é o Modis do satélite Terra e AQUA, que possui uma alta resolução temporal e espectral embora a resolução espacial varia de 250 a 1000 metros, que torna inviável sua utilização em estudos de reservatórios como este, devido a área de estudo ser pequena para a análise de dados com 250 metros de resolução. Foi utilizado a fusão de

imagem Modis com o sensor PAN da Landsat 8. Para tal procedimento, é necessário ajustar os sensores para que se tornem compatíveis a fusão, portanto, antes desse procedimento foi realizado a reprojeção para o sistema de coordenadas planas UTM WGS84 22S, compatível com as imagens Landsat, Sentinel e coordenadas colhidas pelo GPS, o recorte para ajuste da área compatível com ambas as imagens e a reamostragem dos pixels da imagem Modis de 250 para 15 metros.

Os produtos das imagens Modis disponibilizadas para download tem vários níveis de processamento, desde a imagem sem correções, e até imagens com cálculos de índices de vegetação. Neste trabalho utilizaram-se as imagens 09A1 por possuírem correção atmosférica e geométrica, e possibilitar a composição colorida em cor verdadeira, para isso seus pixels da faixa vermelho e infravermelho são reamostrados para 500 metros de resolução espacial. No entanto, para realizar o processo de fusão, é necessário que as imagens a serem fusionadas estejam com a composição colorida.

E por último o sensor MSI do satélite Europeu Sentinel, lançado em 2015 e com poucos estudos sobre sua aplicabilidade. Esse sensor tem resolução espacial de 10 metros para as bandas Azul, verde, vermelha e uma pequena faixa de Infra-Vermelho-Próximo. Seus resultados foram comparados com as imagens do sensor OLI e com a Fusão do OLI e Modis, para avaliar a eficiência dos métodos de fusão para o estudo da qualidade da água.

Nas imagens de satélite, para minimizar a influência dos gases atmosféricos nos sensores, de forma a corrigir os fatores de distorção, foram aplicadas correções atmosféricas nas imagens Sentinel 2 e Landsat 8, as imagens MODIS foram adquiridas com a refletância de superfície já corrigida. O processo de correção atmosférica foi realizado através do software Envi, com a extensão da ferramenta Flaash.

Na fase de pré-processamento das imagens, além da correção atmosférica foi aplicada a conversão de números digitais dos pixels das imagens para valores de refletância, esse procedimento é realizado durante o processo de correção atmosférica, onde os resultados são apresentados em refletância do topo da atmosfera. A refletância do topo da atmosfera (TOA) pode sofrer interferência dos gases da atmosfera, portanto, seus valores de refletância não são exclusivamente do objeto da superfície terrestre, mas de uma mistura de sinais da superfície com outros da atmosfera, por isso, a TOA também é conhecida como refletância aparente (Andrade e Silva, 2013).

O algoritmo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* (Flaash), presente na plataforma Envi, com a finalidade de correção das imagens, consiste em utilizar as bandas na faixa termal (que não interagem com vapor d'água) para calibrar as bandas na faixa do visível e IRP. Durante esse processo é realizado o ajuste da transformação dos valores de números digitais em radiância e posteriormente adquirem valores de refletância de superfície (BOA), a refletância de superfície adquirida após a correção atmosférica reduz os efeitos da passagem do sinal pela atmosfera como ocorre na refletância de superfície.

Diante disso, ao adquirir imagens de satélite são necessárias informações sobre o nível de processamento que foi aplicado a ela. Geralmente uma mesma imagem pode ser adquirida em diferentes níveis de processamento, essas informações são fornecidas na nomenclatura das imagens. Quanto maior o nível de processamento, mais demorada é a disponibilização da imagem para download. Os níveis de processamento e a nomenclatura dada a ele variam de cada empresa responsável por desenvolver e disponibilizar os satélites e sensores. Não há um padrão entre elas.

As imagens do satélite Sentinel 2 foram adquiridas no nível de processamento 1C (figura 26), neste nível, são realizadas recorte da cena para o tamanho de 100 x100km, ortorretificação da imagem e cálculo de refletância no topo da atmosfera (TOA) (*European Space Agency*, 2017).

Por ser um satélite relativamente novo, os softwares de processamento utilizados nesta pesquisa, não estão totalmente adaptados para processar imagens dos satélites Sentinel, diante disso, o processo de correção atmosférica foi realizado pelo software Snap (*Sentinel Application Platform*), esse software, desenvolvido e disponibilizado pela ESA (*European Space Agency*), para a correção e processamento das imagens da constelação dos satélites Sentinel, realiza a correção atmosférica.

Com ele foi possível transformar as imagens Sentinel 2 de valores de refletância do topo da atmosfera (nível 1C) para refletância de superfície (nível 2 A), reduzindo os efeitos atmosféricos das imagens. A partir do recorte das cenas, com as devidas correções atmosféricas, padronização do sistema de projeção, extração da área de estudo de cada reservatório, espacialização dos pontos de amostras de água, de forma que todas as imagens possuam a mesma delimitação de área, possibilitando a comparação entre diferentes sensores.

4. MÉTODOS

4.1. COLETA E PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS DE ÁGUA

Foram realizadas duas campanhas de campo, em ambas houve a coleta de oito pontos amostrais especializados próximos a barragem conforme mostram as figuras 21 e 22. A quantidade de pontos de coleta foi determinada pela capacidade de análise do laboratório de recursos hídricos da Faculdade de engenharia civil da Universidade Federal de Uberlândia, onde as amostras foram posteriormente analisadas. A primeira coleta, no reservatório Amador Aguiar I foi realizada há aproximadamente 10 centímetros da superfície, na data de 29/11/2017 no período da manhã, e no reservatório Capim Branco II foram utilizados os mesmos procedimentos no dia 30/02/2018.

As oito amostras de cada reservatório, foram coletadas próximas a barragem, devido esse local possuir maior largura, os pontos foram coletados com 10 cm de profundidade, e os locais de coleta foram coletadas as coordenadas através do GPS Garmim com precisão de 12 metros. Os dados colhidos no período chuvoso, que é caracterizado pelo maior carreamento de sedimentos, apresentaram baixas taxas de sólidos e turbidez. As amostras coletadas foram armazenadas em garrafas numeradas e anotadas as coordenadas referentes ao ponto de retirada, e no mesmo período do dia, foram realizadas as leituras de turbidez, evitando assim que as amostras sedimentem.

As leituras de turbidez foram realizadas através do turbidímetro AP2000, para cada ponto amostral foram realizadas três leituras de turbidez para reduzir erros. O turbidímetro é constituído de um nefelômetro, este é uma fonte de luz que ilumina a amostra e indica o total de luz espalhada em ângulo reto ao caminho da luz incidente, através do detector fotoelétrico, quanto maior a intensidade da luz espalhada, maior será a turbidez, sendo, portanto, expressa em unidades nefelométricas de turbidez (UNT). Para análise de sólidos, foi extraído somente sólidos totais, segundo metodologia descrita na norma técnica NTU 013 da SABESP (1999).

A análise de sólidos totais foi realizada separando três amostras contendo 150 ml de água cada, em cada ponto de coleta, a fim de reduzir erros de medições. Estas foram armazenadas em cápsulas de porcelana previamente calcinadas, pesadas na balança de precisão (modelo Shimadzu AY220), e identificadas com o número, sendo, portanto, analisadas 3 leituras de sólidos em cada ponto.

Este material foi colocado em uma estufa para evaporação, após a secagem, foi novamente pesado. O total de sólidos consiste na diferença entre a massa da capsula vazia (m_1) e a massa da capsula com resíduo (m_2), segundo a fórmula:

$$R = \frac{(m_2 - m_1) * 1000}{v} \quad (17)$$

R corresponde ao resíduo total (mg/l)

M2 corresponde a massa da capsula com resíduo (mg)

M1 é a massa da capsula vazia (mg)

V é o volume da amostra (ml)

As amostras devidamente armazenadas foram analisadas no laboratório de recursos hídricos da universidade federal de Uberlândia. Posteriormente foram adquiridas imagens de satélite em datas próximas as coletas, devido a resolução temporal de cada sensor, as imagens apresentaram diferenças quanto as datas, conforme apresenta o fluxograma abaixo (Figura 19):

As imagens de satélite foram adquiridas pelo serviço geológico dos Estados Unidos, através da plataforma Earth Explorer. Foram utilizadas imagem das datas mais próximas às datas de coleta de água, que não apresentem nuvens nas áreas do reservatório. Portanto, para cada amostra de água, serão adquiridas uma imagem de cada satélite.

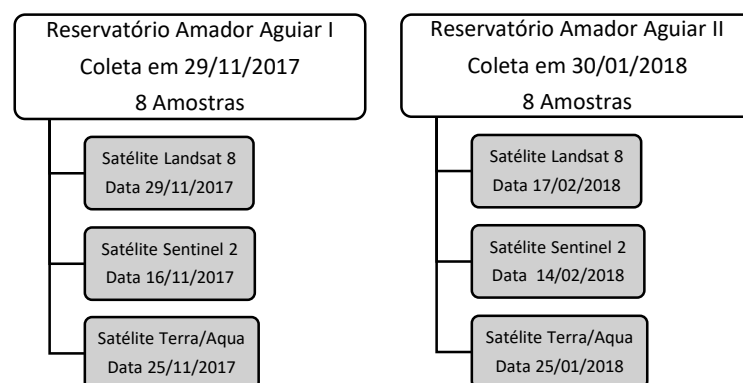


Figura 19: Fluxograma das coletas realizadas nos reservatórios e as imagens de satélite analisadas.

As coordenadas dos pontos de coleta de amostras foram distribuídas na área dos reservatórios pelo software de SIG QGIS. Este software de SIG com licença livre permite a contribuição dos utilizadores e apresenta uma interface que permite extensões de outros softwares de SIG, portanto, dentro do QGIS é possível trabalhar com softwares como o Grass, o Orfeo Monteverdi, o Saga, entre outros, além de aplicativos em forma de extensões criadas por utilizadores de SIG.

Os pontos de coleta de amostras, depois de especializados no QGIS, foram gerados na tabela de atributos, campos referentes aos valores dos parâmetros medidos classificados pelas datas das coletas. Dessa forma é possível realizar a interpolação dos pontos de acordo com os valores de sólidos e turbidez da água.

4.2. FUSÃO DE IMAGENS

As imagens multiespectrais de 30 metros de resolução espacial do satélite Landsat 8, foram fusionadas com a banda Pan de 15 metros deste mesmo satélite, para obter as bandas multispectrais com resolução espacial de 15 metros. E através da classificação supervisionada da imagem fusionada foram extraídas as informações da classe de água. A partir desse arquivo as imagens analisadas foram recortadas pelo shapefile resultante da vetorização da imagem classificada da água (figuras 20 e 21). Possibilitando, dessa forma, a extração da água em toda a extensão dos reservatórios Amador Aguiar I e II.

Com a extração das áreas dos reservatórios, foi criado um arquivo do tipo vetor contendo a delimitação espacial dos reservatórios. As áreas dos reservatórios serviram de recorte para as imagens analisadas, isolando os pixels referente a área de estudo. Dessa forma, o histograma foi ajustado para realce somente dos pixels com informações de refletâncias correspondentes a água. Esse procedimento aumenta o contraste entre pixels de valores próximos (figura 28 e 29).

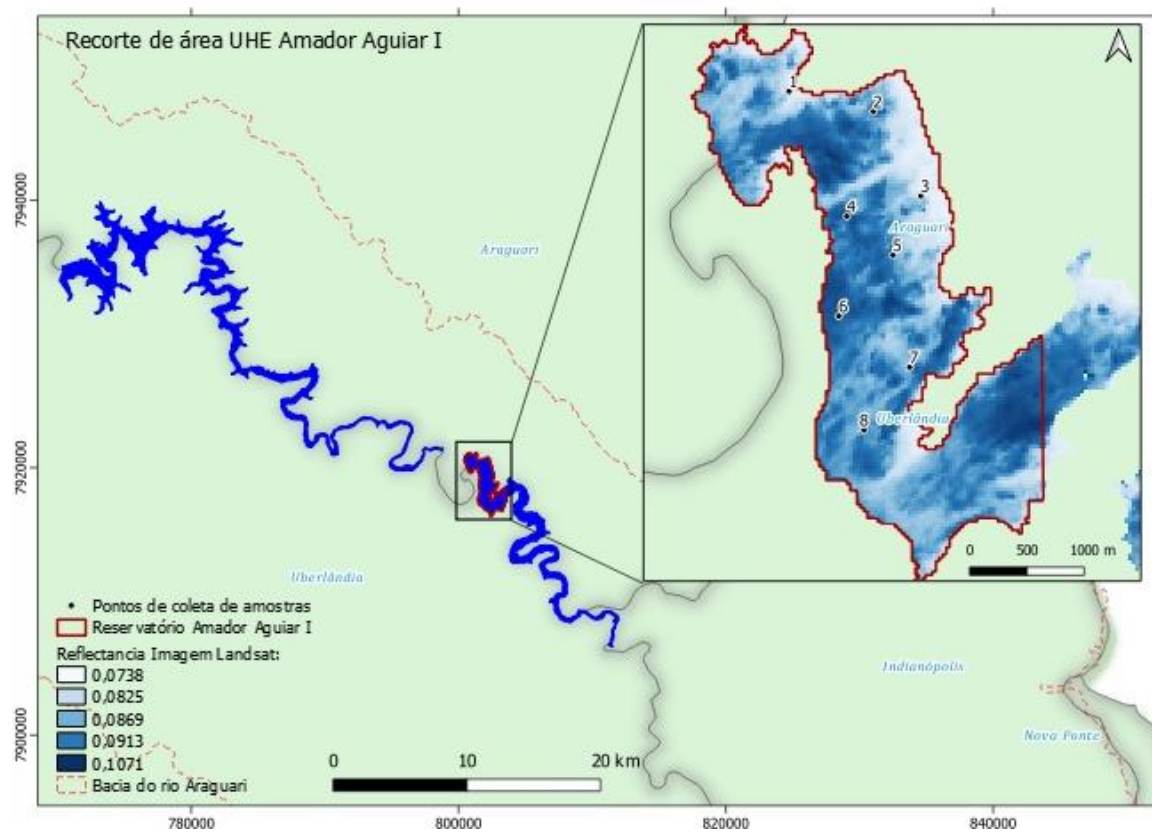


Figura 20: Valores de refletância da banda 2 da imagem Landsat-8 da data de 29/11/2017, destacando o recorte da área do reservatório Amador Aguiar I e os pontos de coleta de amostra de água.

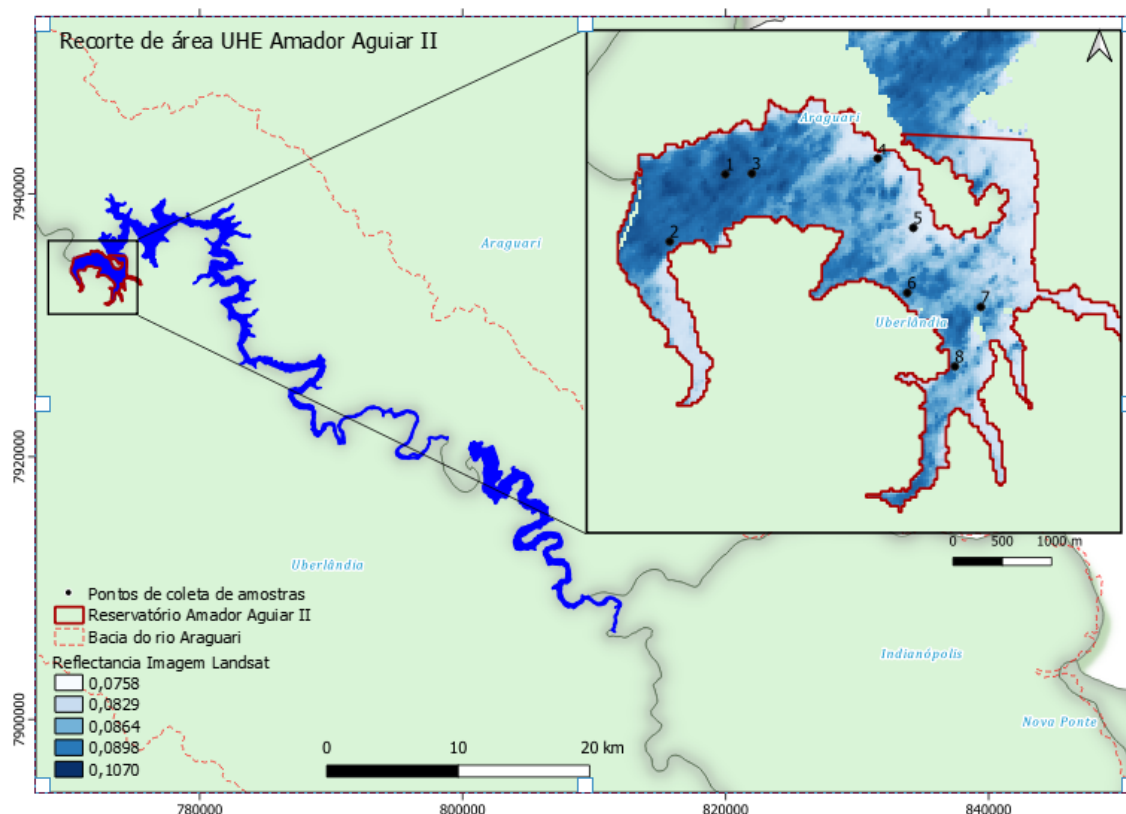


Figura 21: Valores de refletância da banda 2 da imagem Landsat 8 da data de 17/02/2018, destacando o recorte da área do reservatório Amador Aguiar II e os pontos de coleta de amostra de água.

4.3. ANÁLISE DAS IMAGENS E CRUZAMENTO DOS DADOS

Após a espacialização dos pontos de coleta nos reservatórios e interpolação dos resultados, os valores de refletância nas bandas azul e verde, vermelho e infravermelho dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2, e bandas vermelho e infravermelho do sensor Modis, foram comparadas com as respostas dos parâmetros de sólidos totais e de turbidez das amostras de campo.

Além das resoluções temporal e espacial dos sensores, foram analisados os resultados de acordo com a resolução espectral e radiométrica dos satélites, apesar da semelhança entre as bandas do Landsat e Sentinel, este último apresenta algumas faixas espectrais mais estreitas, o que pode realçar ou omitir informações.

Portanto, este trabalho utilizou os modelos de estimativa de sólidos na água da literatura, aplicados as imagens do satélite Sentinel, no intuito de verificar a eficácia deste sensor nos

resultados, pois as imagens desse sensor apresentam melhor resolução espacial que o Landsat e o Modis.

Foram analisadas as respostas espectrais das bandas do Azul, verde e infravermelho, dos satélites Sentinel e Landsat e bandas do vermelho e infravermelho do sensor Modis, nos pontos de coleta de amostras de água. Os valores de turbidez e sólidos totais foram realizados análise de variância. Posteriormente, comparados com esses comprimentos de onda de cada satélite, qual, ou quais apresentaram melhores resposta para os parâmetros analisados.

As coletas de água foram realizadas no período chuvoso. Os dados de qualidade da água nesses reservatórios foram cruzados com dados da mesma área obtidos pelos sensores dos satélites, nos anos de 2017 e 2018. Na fase de processamento das imagens, foram realizados os procedimentos de acordo com a figura 22.

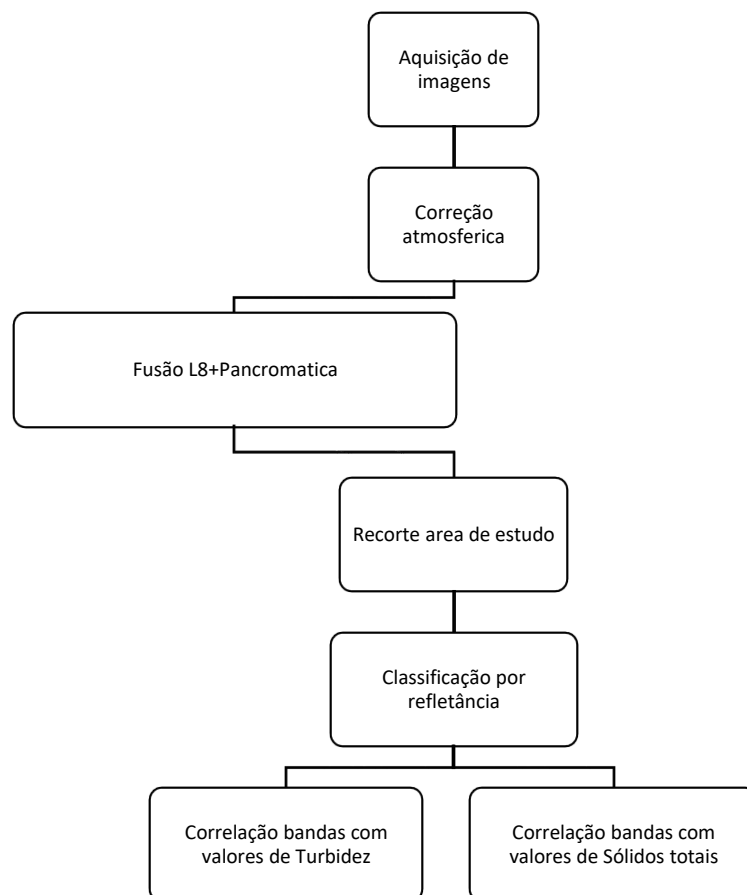


Figura 22: Fluxograma referente ao processo de aquisição, processamento e análise estatística das imagens Landsat 8, Sentinel 2 e Modis com os resultados de sólidos totais e turbidez.

Ao longo dessa pesquisa constata-se que os valores de turbidez e de sólidos dos reservatórios Amador Aguiar apresentaram índices baixos (tabela 6). A profundidade dos reservatórios, que favorece a sedimentação, juntamente com a formação geológica da região, compostas por rochas basálticas que reduz a quantidade de sedimentos, são fatores que contribuem para que a água da superfície se apresente com poucos sólidos. Portanto, exige uma análise estatística mais detalhada dos valores colhidos em campo e dos valores de resposta dos satélites.

Tabela 6: Resultados de sólidos totais e turbidez por pontos amostrais

Reservatório Amador Aguiar I		
Pontos	Sólidos totais (mg/l)	Turbidez (ntu)
1	70,67	2,08
2	115,33	1,56
3	74,67	1,45
4	77,00	1,93
5	90,67	1,41
6	82,33	1,22
7	96,67	1,69
8	89,00	1,45
Reservatório Amador Aguiar II		
1	172,67	2,11
2	110,33	2,13
3	213,00	2,16
4	110,67	2,15
5	129,33	2,17
6	95,00	3,98
7	115,67	2,87
8	110,67	1,99

Foi realizada a interpolação dos dados colhidos em campo por valores de turbidez e por valores de resíduos totais. Foi utilizado o método peso pelo inverso da distância IDW. A interpolação é utilizada para estimar valores de uma região a partir de pontos conhecidos de forma a cobrir toda uma região de interesse, no caso desta pesquisa, esse método foi utilizado para estimar os valores de turbidez e sólidos totais (resíduos) de toda a área amostral. Pois não é possível coletar dados de água de todo o reservatório por pontos de coleta em campo. As amostras coletadas próximas à barragem foram georreferenciadas, a após análise em laboratório e os resultados foram especializados no software de SIG QGis.

Os resultados para sólidos e turbidez, conforme indicam as figuras 20 e 21, apresentaram valores baixos em ambos os reservatórios, consequentemente, em ambas as análises, a variação dos valores também foram pequenas, conforme já era esperada, devido às características de ambos (geologia, profundidade, vegetação ciliar e localização), as diferenças entre as amostras também foram pequenas o que mostra uma homogeneidade na qualidade da água do complexo Capim Branco.

Os valores, tanto de sólidos totais como de turbidez, no reservatório Amador Aguiar II foram maiores, quando comparados ao I. Os pontos especializados no mapa e interpolados por resultados de sólidos e turbidez (figuras 23 e 24) foram atribuídos a mesma escala de valores, para serem comparados, através deles é possível distinguir mais claramente que reservatório Amador Aguiar II apresentou resultados maiores (tons mais escuros nas figuras 23 e 24) quando comparado ao reservatório Amador Aguiar I (tons mais claros nas figuras 23 e 24). Considerando que as coletas para amostragem foram realizadas no período chuvoso dessa região, onde o carreamento de sedimentos é maior, podemos dizer que esses reservatórios apresentam boa qualidade quando analisados sólidos e turbidez.

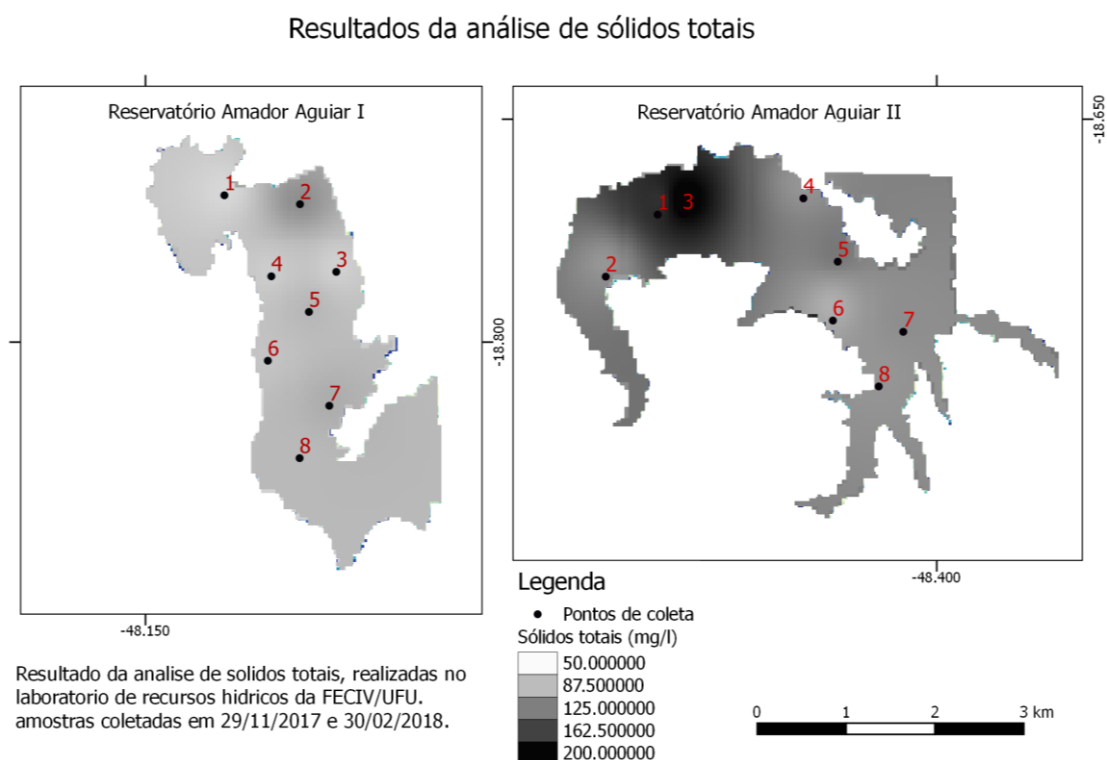


Figura 23: Interpolação dos resultados de sólidos totais nos reservatórios Amador Aguiar I e II

Resultados da análise de turbidez

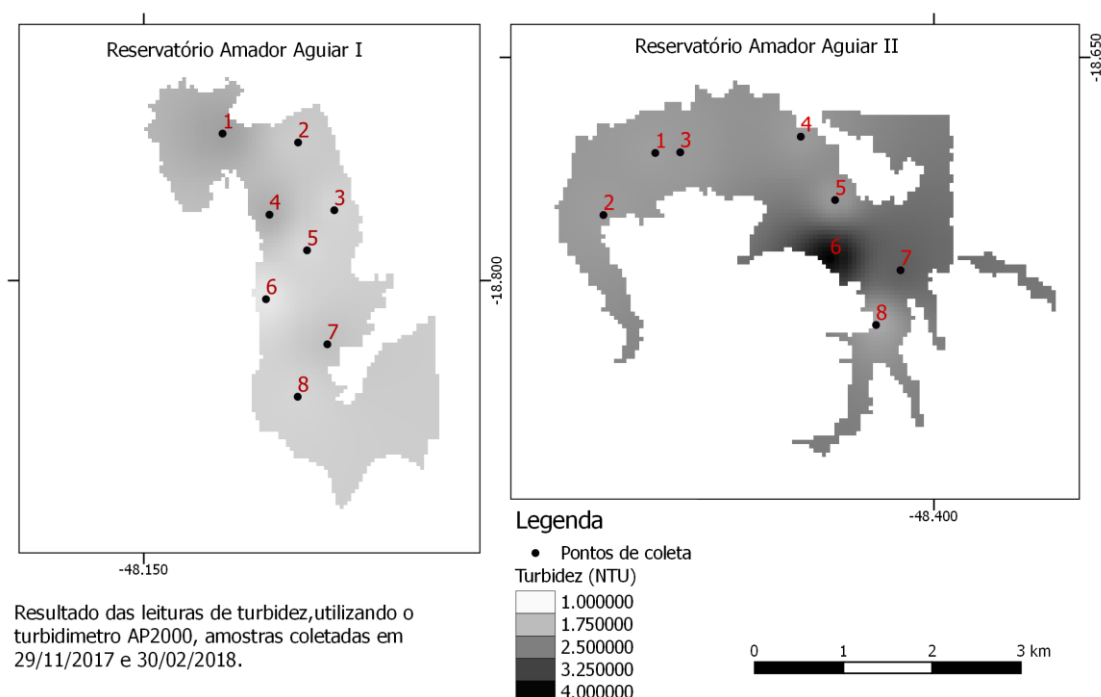


Figura 24: Interpolação dos resultados de turbidez nos reservatórios Amador Aguiar I e II

Pelo histograma é possível analisar que os sólidos totais no reservatório Amador Aguiar I houve maior frequência de valores próximo a 90 mg/l enquanto no Amador Aguiar II o pico do histograma está próximo a 115 mg/l. O mesmo ocorre com os valores de turbidez colhidos em cada um dos reservatórios, os dados do Amador Aguiar II têm valores maiores que do I.

A comparação com todas as bandas foi realizada configurando para cada uma o mesmo intervalo de valores de refletância (figuras 25 e 26), dessa forma, foi possível verificar quais as bandas que apresentam maiores e menores respostas. E conforme presente na literatura fica evidente que a refletância da água tem maiores respostas nos menores comprimentos de onda, à medida que de os comprimentos de onda aumentam a resposta espectral da água diminui.

Os valores de refletância foram tabelados por reservatórios e por bandas dos satélites analisados, nas tabelas 7 e 8 é possível verificar que os valores de refletância das bandas analisadas em vários pontos de coletas seguem em padrão de valores.

Refletância das bandas do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar I

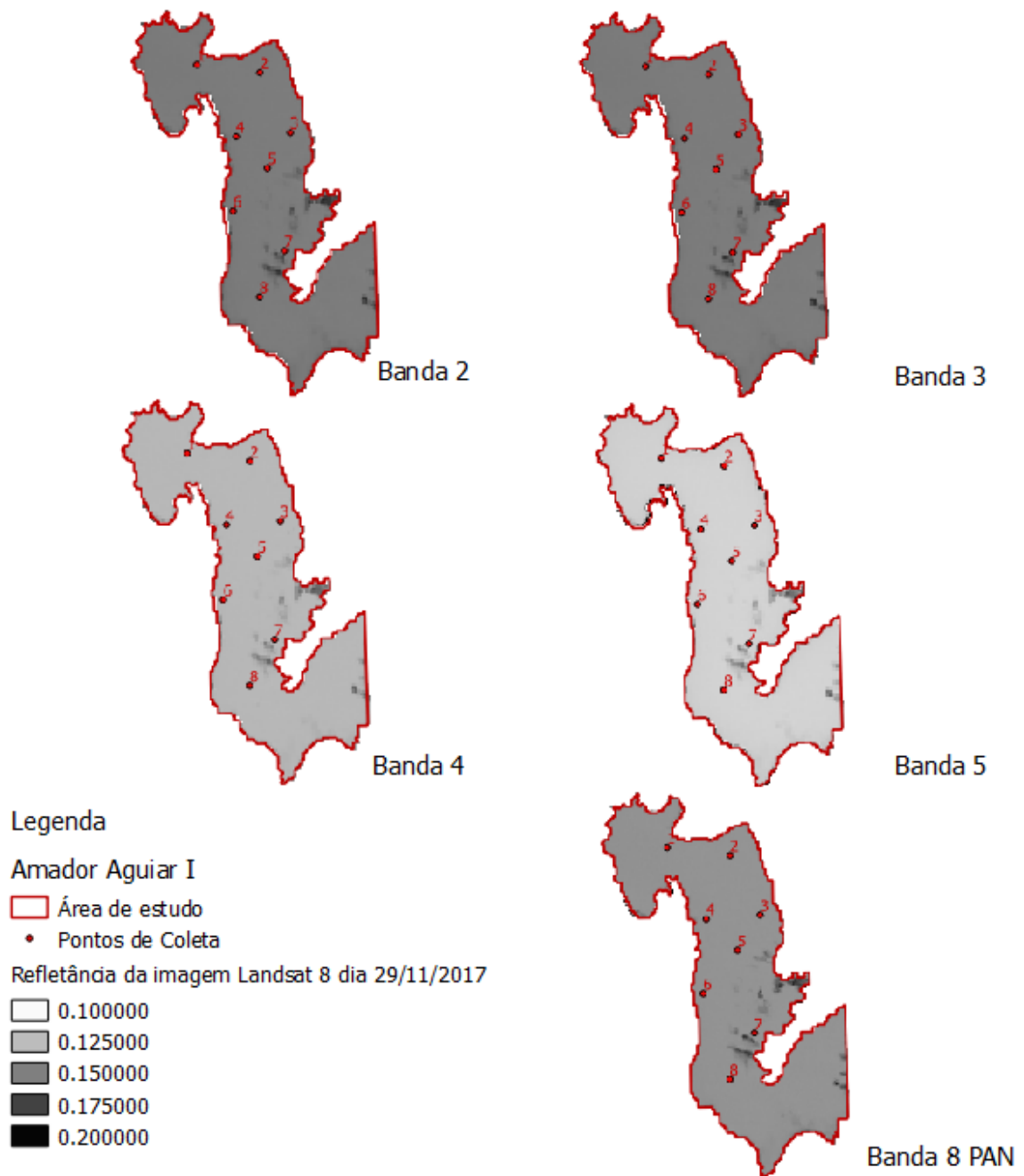


Figura 25: valores de refletância da area de estudo nas bandas 2, 3, 4, 5 e 8 do satélite Landsat-8 da data de 29/11/2017.

Refletância das bandas do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar II

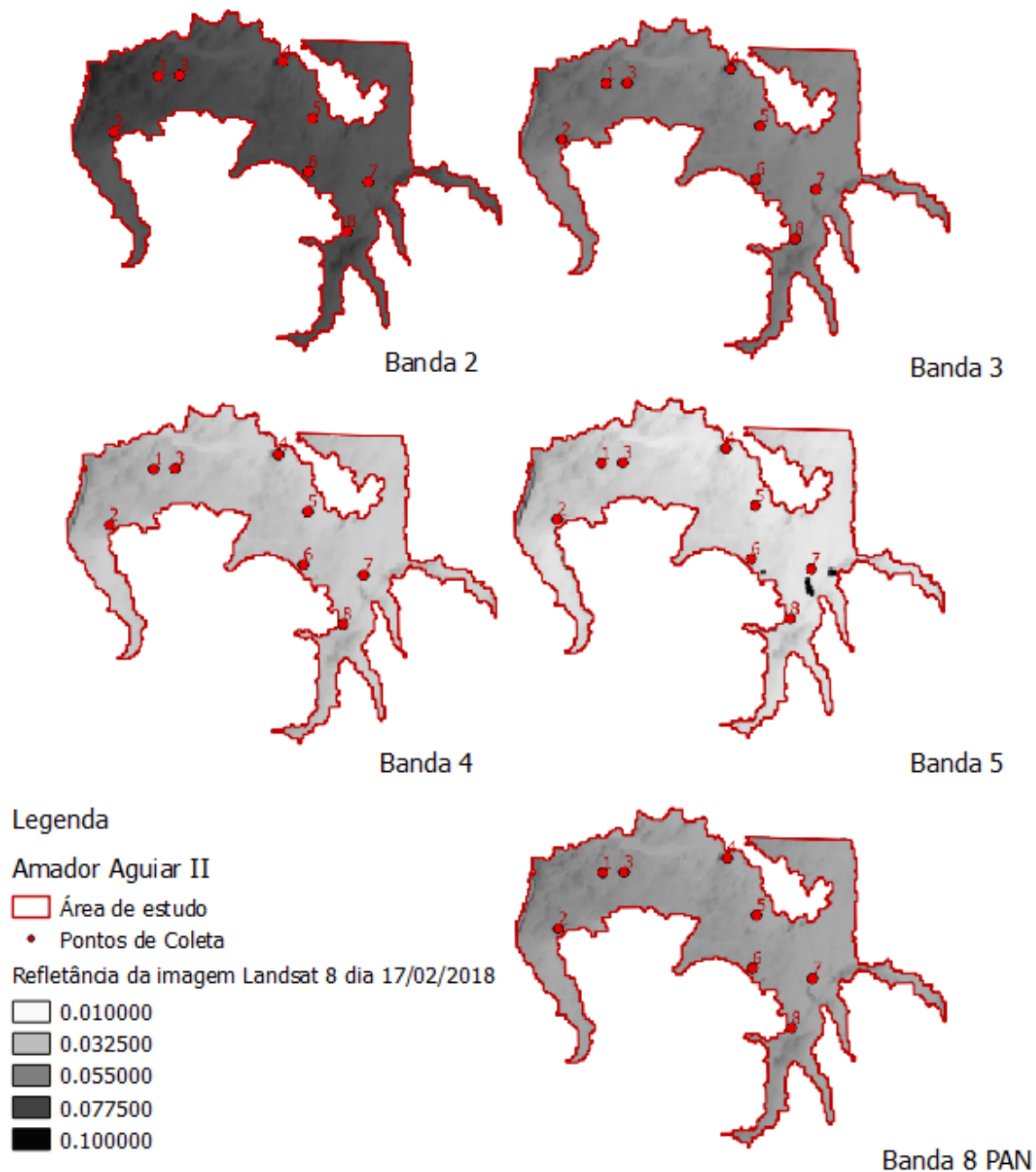


Figura 26: valores de refletância da area de estudo nas bandas 2, 3, 4, 5 e 8 do satélite Landsat-8 da data de 17/02/2018.

Os valores de refletância das tabelas 8 e 9 foram organizados em forma de gráfico para facilitar a comparação das respostas das bandas nos pontos de coleta de água. Através do gráfico 3 verifica que os valores de refletância do sensor Modis apresenta grandes variações comparados com os outros dois sensores. Isso ocorre devido a sua resolução espacial de 250

metros, alguns pixels misturam suas respostas com valores de borda do reservatório. Portanto, não é confiável que seus pixels estejam representando apenas valores referentes a água, pois, essa resolução espacial é inapropriada para aplicação em áreas de estudo como está. Mas essas imagens podem se tornar apropriadas para escalas maiores passando por um processo de fusão, onde os valores dos pixels são remastados, de forma a apresentar valores a boa resolução espectral em pixels com resolução espacial de quinze ou dez metros.

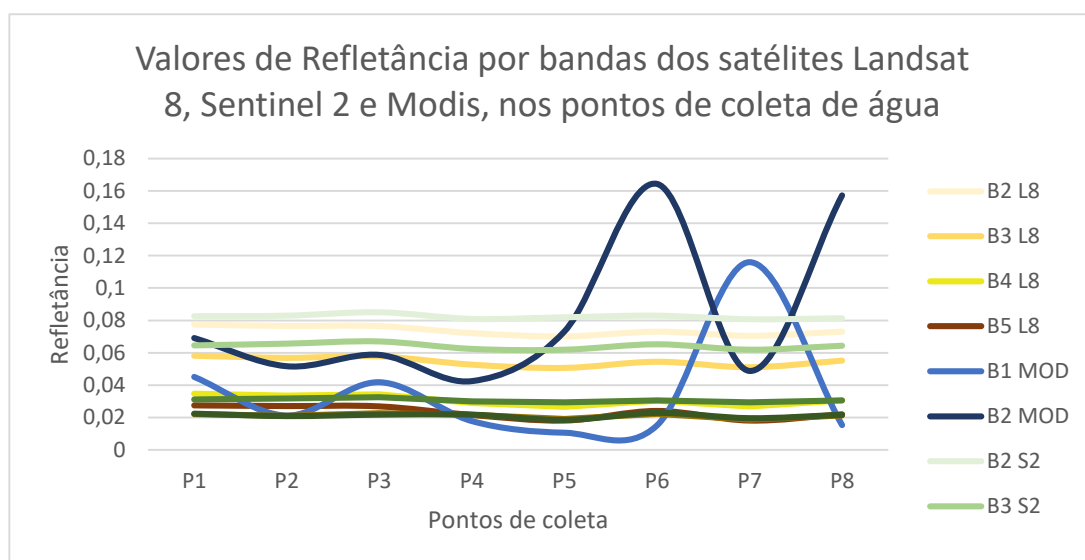


Gráfico 3: comparação dos valores de refletância (eixo y) nos satélites Modis, Sentinel e Landsat,, nos pontos de coleta das amostras de água (eixo x)

Um novo gráfico foi construído eliminando os valores do sensor Modis e comparando apenas as respostas espectrais dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2, ambos sensores presentes nesses satélites apresentam características espectrais bem aproximadas, tal como apresenta o gráfico 3. Os sensores OLI do Landsat 8 e MSI do Sentinel 2 têm características próximas entre si, o que permite que esses sensores sejam utilizados se complementando. No gráfico 5 as respostas espectrais da água nos seguiram um mesmo padrão de respostas, embora sutilmente as bandas da faixa do azul e verde do satélite Sentinel teve resposta um pouco maior do que do Landsat 8. Estas bandas também foram as que apresentaram maiores distinção de resposta. As faixas espectrais do vermelho e infravermelho se diferenciaram sutilmente.

As bandas 8 e 8A do Sentinel 2 apresentaram resultados semelhantes embora a faixa espectral da banda 8 é mais larga do que a 8A, sendo a banda 8 com resolução espacial de 10 metros, enquanto a banda 8A tem resolução espacial de 20 metros.

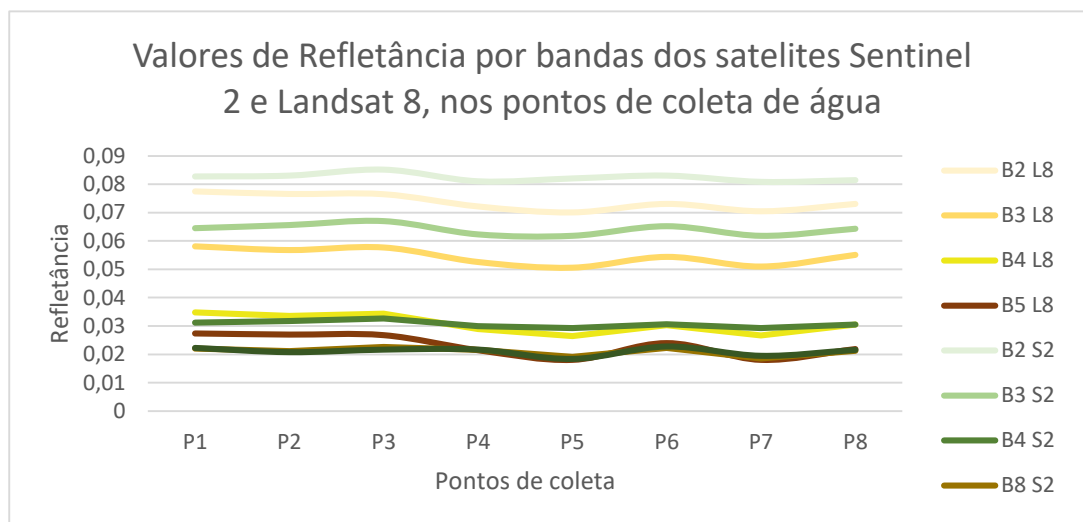


Gráfico 4: Comparação dos valores de refletância nos pontos amostrais dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2

4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores da análise de sólidos totais de turbidez foram correlacionados através da função polinomial, em suas várias ordens, para a verificação do R^2 . Quanto menor a ordem polinomial, mais baixa é a relação de um elemento com outro, e menor também será o coeficiente de correlação. Os gráficos 6 e 7 abaixo mostram a linha de tendência para a função polinomial em quarta ordem, ainda assim os valores de R^2 foram baixos, ou seja, as amostras de sólidos totais e turbidez apresentaram pouca correlação, o que se explica pelo fato de todos os valores estarem muito próximos, pequenas oscilações de valores podem parecer grandes quando os resultados são baixos.

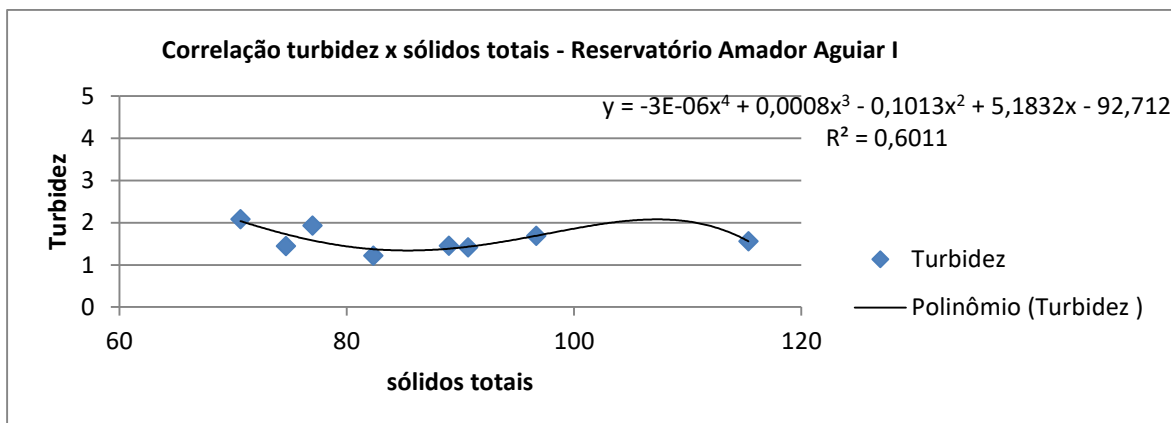


Gráfico 5: Correlação polinomial de quarta ordem entre os valores de Sólidos Totais e turbidez no reservatório Amador Aguiar I

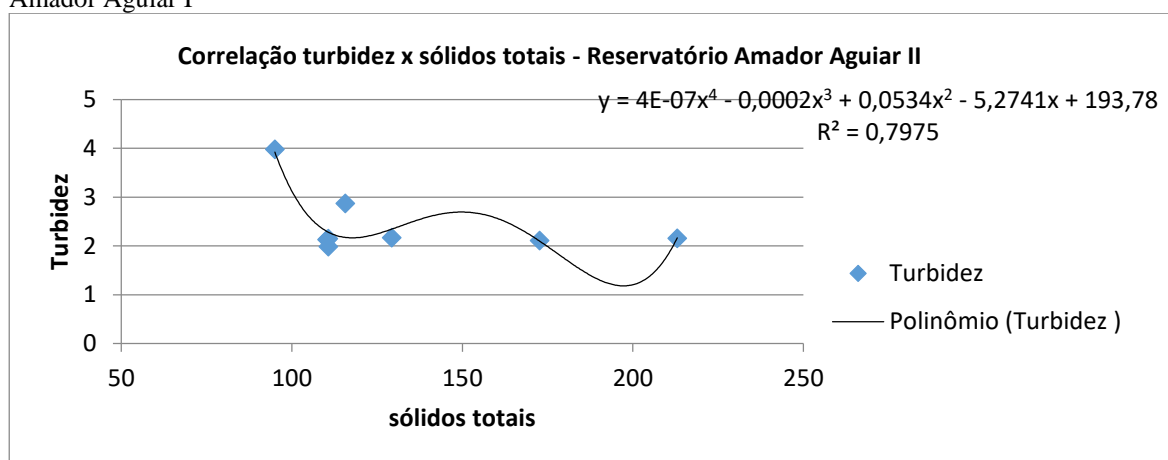


Gráfico 6: Correlação polinomial de quarta ordem entre os valores de Sólidos Totais e turbidez no reservatório Amador Aguiar II

Na tabela 7, contêm os valores de R^2 para cada ordem da equação polinomial, os resultados apresentam que apenas a partir da quinta ordem o reservatório Amador Aguiar II apresenta índices de correlação satisfatória entre as amostras de sólidos totais e turbidez, enquanto no reservatório Amador Aguiar I, apresenta índices de correlação satisfatórios somente na sexta ordem. O reservatório Amador Aguiar II, apresentou maiores resultados de sólidos totais também maiores valores de correlação.

Tabela 7: Valores de correlação exponencial (R^2) da ordem 2 a 6, entre os resultados de sólidos totais e turbidez

Ordem	Amador Aguiar I	Amador Aguiar II
2	0,3255	0,4308
3	0,5842	0,6627
4	0,6011	0,7975
5	0,6019	0,9932
6	0,8	0,9994

Através dos gráficos de dispersão 7 e 8 é possível visualizar que a refletância tem maiores valores na banda do espectro azul (Banda2) e gradativamente os valores reduzem à medida que as bandas aumentam (Banda 3 e 4), comum da assinatura espectral da água tanto nas bandas do satélite Landsat como nas do Sentinel. No entanto, os resultados apontam que os reservatórios apresentam baixos valores tanto de turbidez como de sólidos totais. Caso contrário os valores nas bandas do infravermelho e vermelho teriam valores de refletância maiores. Devido aos baixos índices, a correlação polinomial aplicada na comparação de sólidos totais e turbidez com as bandas dos satélites Landsat, Modis e Sentinel, em todas as ordens os resultados apresentaram índices não satisfatório, indicando que a análise em questão não tem correlação significativa (tabela 8).

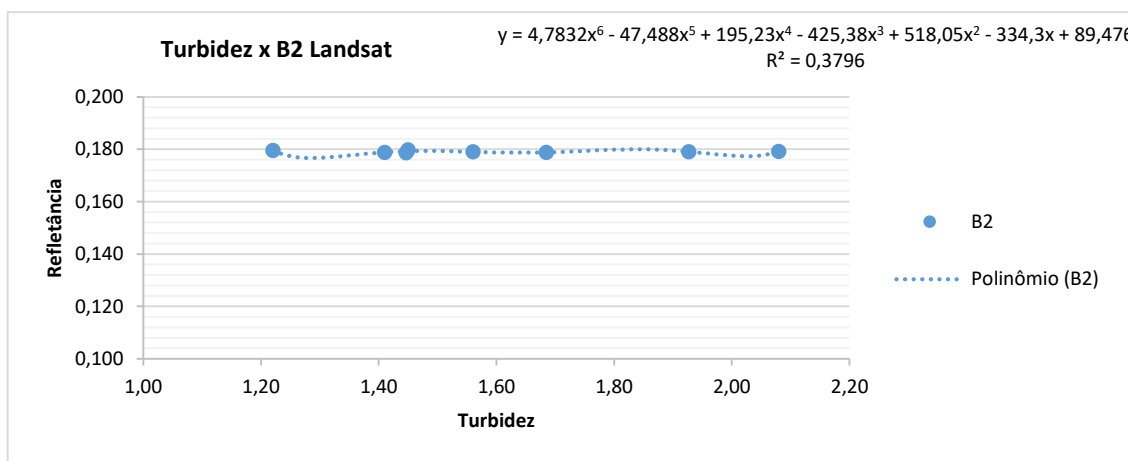
Tabela 8: Resultados da correlação polinomial dos parâmetros de sólidos totais e turbidez e as bandas dos satélites Landsat, Modis e Sentinel.

Satélites Landsat, Modis e Sentinel												
Ordem polinomial	Landsat				Modis			Sentinel				
	B2	B3	B4	B5	B1	B2	B2	B3	B4	B8	B8a	
Sólidos totais	2	0,3271	0,3523	0,3747	0,3011	0,1412	0,234	0,7302	0,5872	0,2938	0,4133	0,2579
	3	0,496	0,5385	0,545	0,532	0,2175	0,4125	0,764	0,6657	0,6258	0,6761	0,7047
	4	0,7285	0,7605	0,7528	0,7065	0,3145	0,4536	0,7893	0,7153	0,7367	0,7728	0,914
	5	0,8349	0,8696	0,8696	0,8396	0,7808	0,9579	0,8519	0,806	0,8133	0,9836	0,9577
	6	1,048	0,9343	1,0055	1,0036	0,8426	1,0001	1,863	1,1473	1,0839	1,0267	1,0243
		B2	B3	B4	B5	B1	B2	B2	B3	B4	B8	B8a
Turbidez	2	0,2159	0,2763	0,2482	0,2355	0,2224	0,2221	0,1096	0,2546	0,1857	0,4987	0,427
	3	0,2455	0,2775	0,2693	0,2903	0,3082	0,2637	0,3301	0,2651	0,2321	0,5339	0,435
	4	0,669	0,5926	0,6166	0,2748	0,3172	0,2856	0,3319	0,3228	0,3335	0,6245	0,6444
	5	0,3737	0,5974	0,6232	0,7001	0,6849	0,5238	0,3233	0,369	0,3902	0,697	0,7188
	6	2,961	-3,391	-2,061	1,0011	1,3495	0,6917	-41,42	40,046	5,1079	11,457	-4,407
		Amador Aguiar II										
	B2	B3	B4	B5	B1	B2	B2	B3	B4	B8	B8a	
Sólidos totais	2	0,071	0,2362	0,1411	0,0404	0,2184	0,3053	0,4818	0,4453	0,3416	0,3299	0,6989
	3	0,1713	0,2682	0,222	0,1356	0,3475	0,503	0,5156	0,636	0,6001	0,5313	0,705
	4	0,51	0,5794	0,251	0,3379	0,5752	0,79	0,5664	0,641	0,6132	0,5883	0,7921
	5	0,6832	0,8801	0,3783	0,95	0,8779	0,8523	0,8085	0,8023	0,7098	0,7923	0,8687
	6	0,7333	0,9871	0,6437	0,9541	0,9962	0,9508	0,9739	0,9762	0,9986	0,9898	0,9998
		B2	B3	B4	B5	B1	B2	B2	B3	B4	B8	B8a
Turbidez	2	0,2133	0,8236	0,123	0,4299	0,0425	0,0095	0,1692	0,2271	0,3257	0,1414	0,3268
	3	0,2144	0,8257	0,1313	0,4797	0,0712	0,1529	0,529	0,3602	0,354	0,358	0,5153
	4	0,2158	0,8355	0,1941	0,5721	0,6977	0,6192	0,5469	0,364	0,3617	0,3634	0,6466
	5	0,295	0,871	0,1943	0,7884	0,6982	0,6289	0,9166	0,8921	0,906	0,9902	0,917
	6	0,3796	0,8988	0,7948	0,7862	0,7	0,633	0,9411	0,9039	0,9145	0,9916	0,9812
		B2	B3	B4	B5	B1	B2	B2	B3	B4	B8	B8a

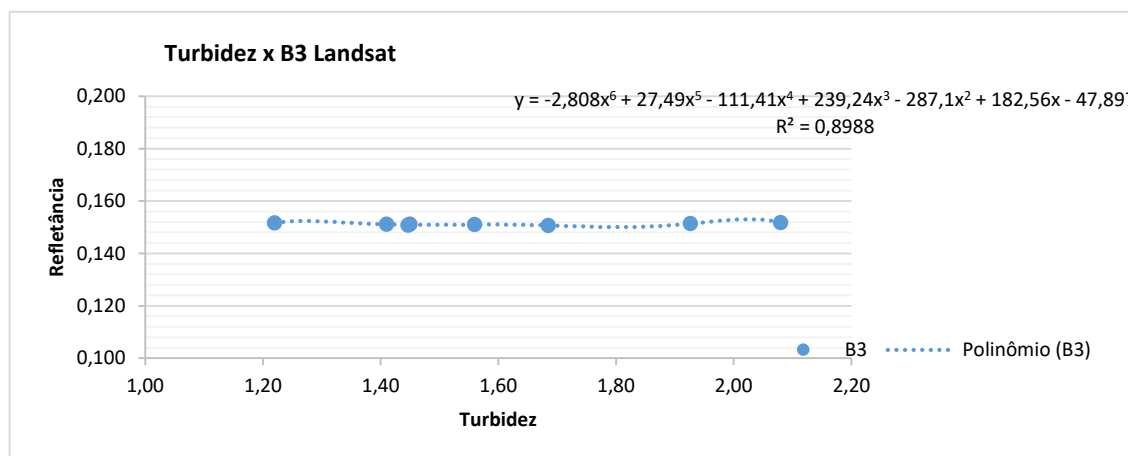
Como em todas as bandas analisadas os maiores índices de correlação estavam nas maiores ordens polinomiais e, portanto, a curva de tendência apresentava distorções. Foi acrescentado para amostra somente três gráficos de dispersão por reservatório para resumir os resultados encontrados (gráficos 7 e 8).

Contudo, é possível verificar a qualidade da água por sensoriamento remoto, assim como a pesquisa de Espinoza et al, (2013) que aplicou o uso dessa tecnologia em águas com grandes concentrações de sedimentos e obteve respostas correlacionadas com as bandas infravermelho e vermelho, também é possível a aplicação em águas com baixa quantidade de sedimentos e em maior escala.

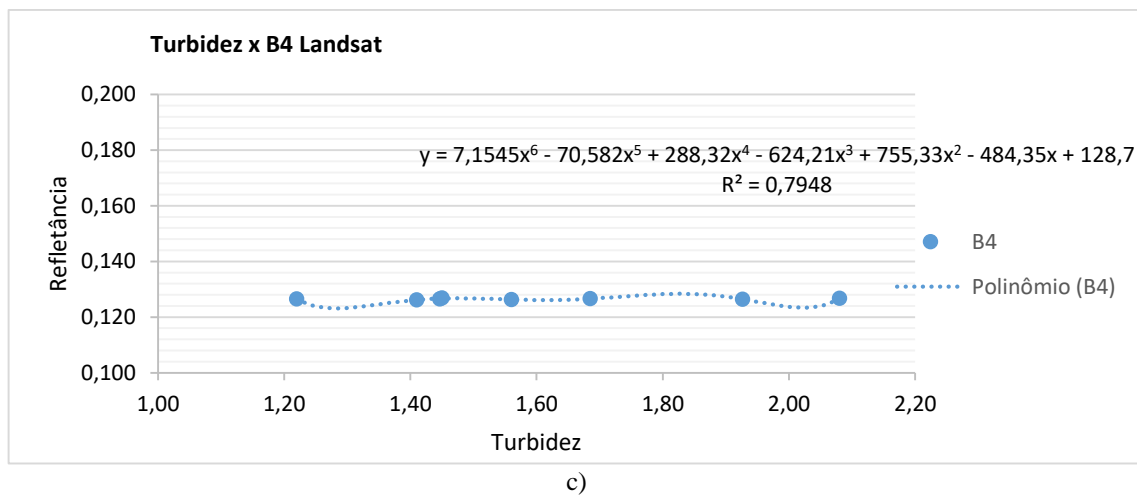
Gráfico 7: correlação polinomial de sexta ordem entre os valores de refletância das imagens Landsat 8 e os resultados de turbidez nas bandas 2, 3 e 4



a)

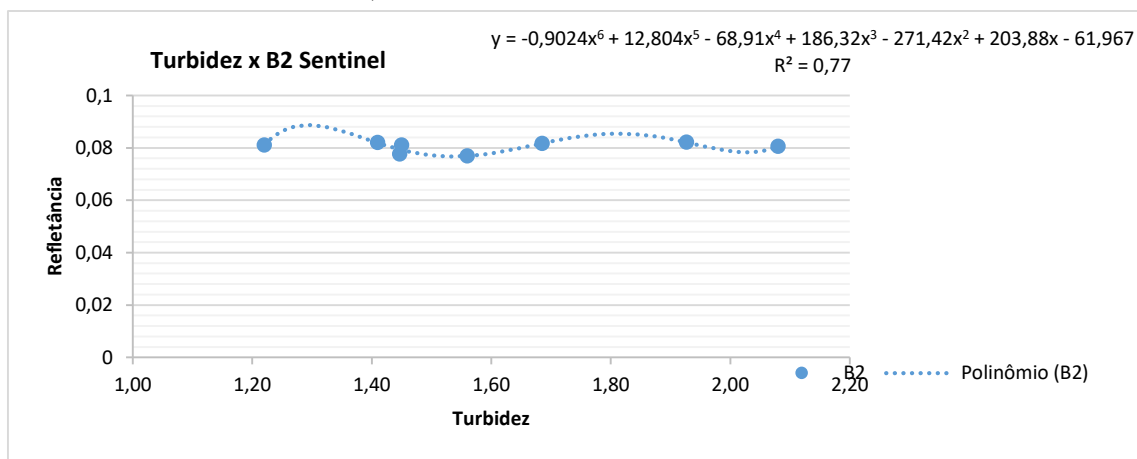


b)

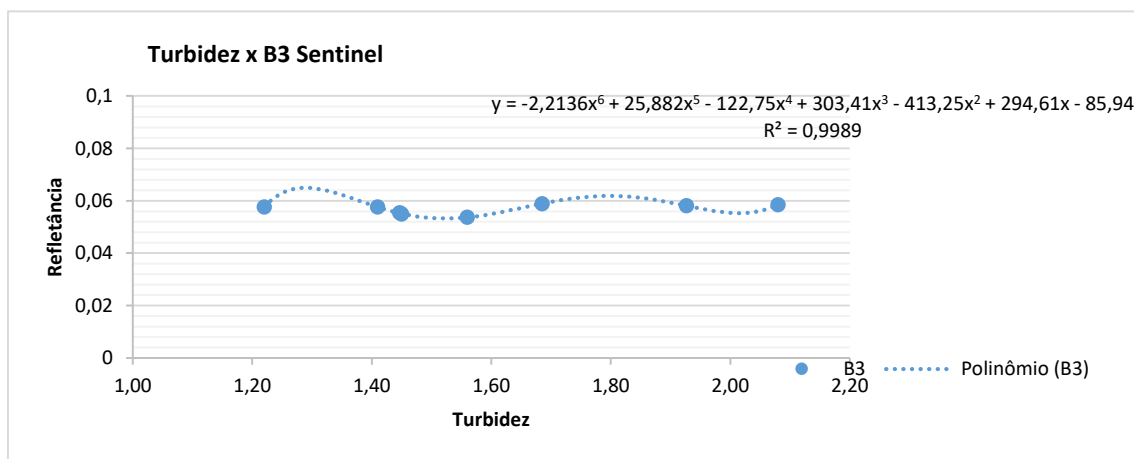


c)

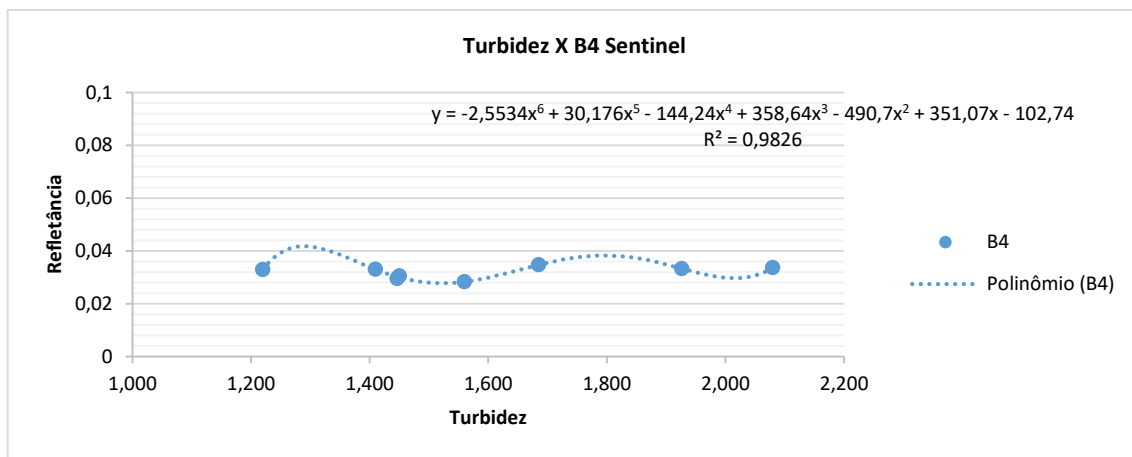
Gráfico 8: Correlação polinomial de sexta ordem entre os valores de refletância das imagens Sentinel2 e os resultados de turbidez nas bandas 2, 3 e 4



a)



b)



c)

Os baixos índices de correlação entre os parâmetros analisados (sólidos totais e turbidez) e os valores de refletância dos satélites conforme indicam os gráficos 6 a 9, ocasionou a aplicação da análise de variância, com o intuito de verificar se os resultados, primeiramente de sólidos totais e turbidez e posteriormente entre as bandas dos satélites, tem diferenças que podem ser consideradas significativas ou não, caso não seja significativas essas diferenças são resultantes da própria variação da medida.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE SÓLIDOS TOTAIS E TURBIDEZ

A estatística foi utilizada para validar os dados colhidos de sólidos totais e turbidez, e para análise da relação entre esses parâmetros com os valores dos pixels dos satélites nas bandas utilizadas. Para as três leituras em cada ponto foram calculadas a média, desvio padrão, e o erro médio. Através da média foram calculados os resíduos de cada ponto, e a análise de variância entre as leituras em todos os pontos de coleta, com o intuito de verificar se houve diferenças significativas nos valores de turbidez (tabela 9) e sólidos totais (tabela 10).

Tabela 9: Análise dos valores de Turbidez do reservatório Amador Aguiar I

Tabela 9: Análise dos valores de turbidez do Reservatório Pindaré Aguilar									
	Repetições- Leituras de turbidez					Análise			
	1.1	1.2	1.3	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	
Pontos de coleta	1	2,51	2,01	1,72	3	2,080000	1,720000	2,510000	0,399625
	2	1,61	1,78	1,51	3	1,633333	1,510000	1,780000	0,136504
	3	1,14	1,46	1,74	3	1,446667	1,140000	1,740000	0,300222
	4	2,07	1,91	1,8	3	1,926667	1,800000	2,070000	0,135769
	5	1,33	1,75	1,49	3	1,523333	1,330000	1,750000	0,211975
	6	1,22	1,22	1,55	3	1,330000	1,220000	1,550000	0,190526
	7	1,75	1,19	1,62	3	1,520000	1,190000	1,750000	0,293087
	8	1,45	1,44	1,46	3	1,450000	1,440000	1,460000	0,010000

Tabela 10: Análise dos valores de sólidos totais do reservatório Amador Aguiar I

Repetições - leitura de sólidos totais					Análise				
	1.1	1.2	1.3	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	
Pontos de coleta	1	73,333	68,000	184,000	3	108,4444	68,00000	184,0000	65,4874
	2	63,333	112,667	118,000	3	98,0000	63,33333	118,0000	30,1404
	3	70,667	116,667	78,667	3	88,6667	70,66667	116,6667	24,5764
	4	79,333	74,667	115,333	3	89,7778	74,66667	115,3333	22,2544
	5	75,333	106,000	272,000	3	151,1111	75,33333	272,0000	105,8098
	6	82,667	224,000	82,000	3	129,5556	82,00000	224,0000	81,7920
	7	168,667	104,667	88,667	3	120,6667	88,66667	168,6667	42,3320
	8	180,667	110,000	68,000	3	119,5556	68,00000	180,6667	56,9379

Tabela 11: Análise dos valores de Turbidez do reservatório Amador Aguiar II

Repetições- Leituras de turbidez					Análise				
	1.1	1.2	1.3	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	
Pontos de coleta	1	2,38	2,05	2,16	3	2,197	2,050	2,380	0,168
	2	1,82	2,15	2,43	3	2,133	1,820	2,430	0,305
	3	2,17	2,14	1,73	3	2,013	1,730	2,170	0,246
	4	2,06	2,24	1,73	3	2,010	1,730	2,240	0,259
	5	2,19	2,41	2,14	3	2,247	2,140	2,410	0,144
	6	4,08	4,04	3,82	3	3,980	3,820	4,080	0,140
	7	3,82	2,85	2,89	3	3,187	2,850	3,820	0,549
	8	1,99	2	1,97	3	1,987	1,970	2,000	0,015

Tabela 12: Análise dos valores de sólidos totais do reservatório Amador Aguiar II

Repetições - leitura de sólidos totais					Análise				
Pontos de coleta	1.1	1.2	1.3	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	
	1	3496,6667	165,3333	180	3	1280,67	165,33	3496,67	1919,126
	2	128,6667	1034,6667	92	3	418,44	92	1034,67	533,979
	3	592,0000	120,6667	305,33	3	339,33	120,67	592	237,5
	4	110,6667	4062,6667	4986	3	3053,11	110,67	4986	2589,714
	5	164,0000	549,3333	94,67	3	269,33	94,67	549,33	244,953
	6	1034,6667	86,6667	103,33	3	408,22	86,67	1034,67	542,581
	7	108,6667	65,3333	122,67	3	98,89	65,33	122,67	29,891
	8	294,0000	114,0000	107,33	3	171,78	107,33	294	105,900

A partir da análise das médias, desvio padrão, pontos máximos e mínimos de desvio, os resultados das tabelas (11 a 12), foram plotadas no gráfico de dispersão para melhor visualização dos resultados, foram elaborados os gráficos de dispersão com a variação mínima e máxima e os resíduos (gráficos 9 a 12)

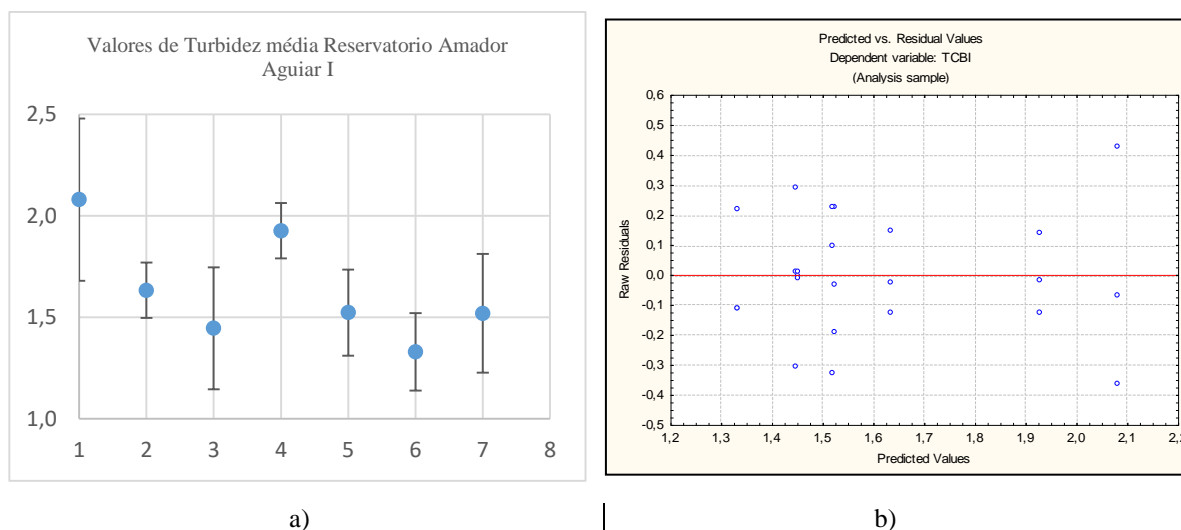


Gráfico 9 : Variações de medidas de turbidez nos reservatórios Amador Aguiar I (a) e análise de resíduos (b)

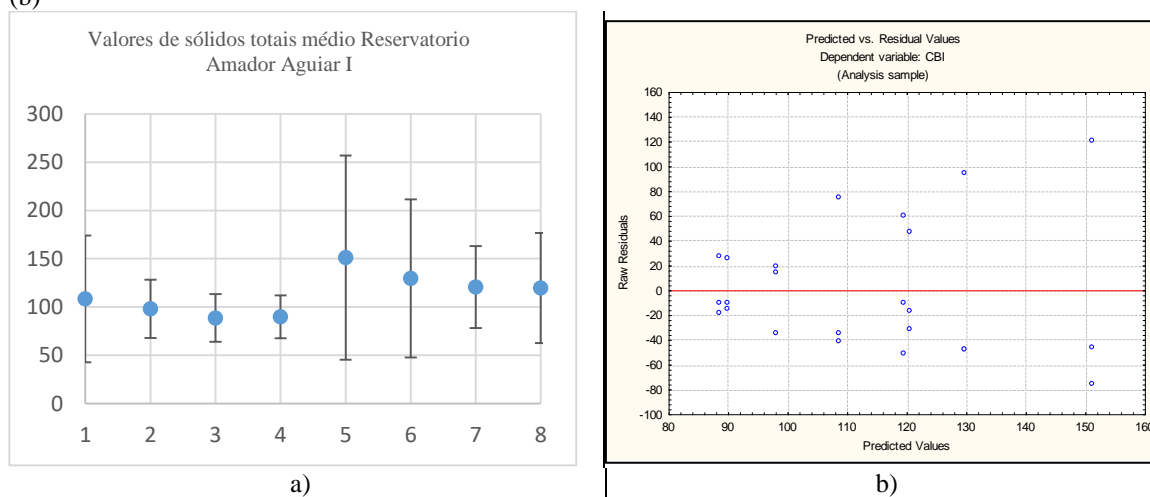


Gráfico 10 : Variações de medidas de sólidos totais nos reservatórios Amador Aguiar I (a) e análise de resíduos (b)

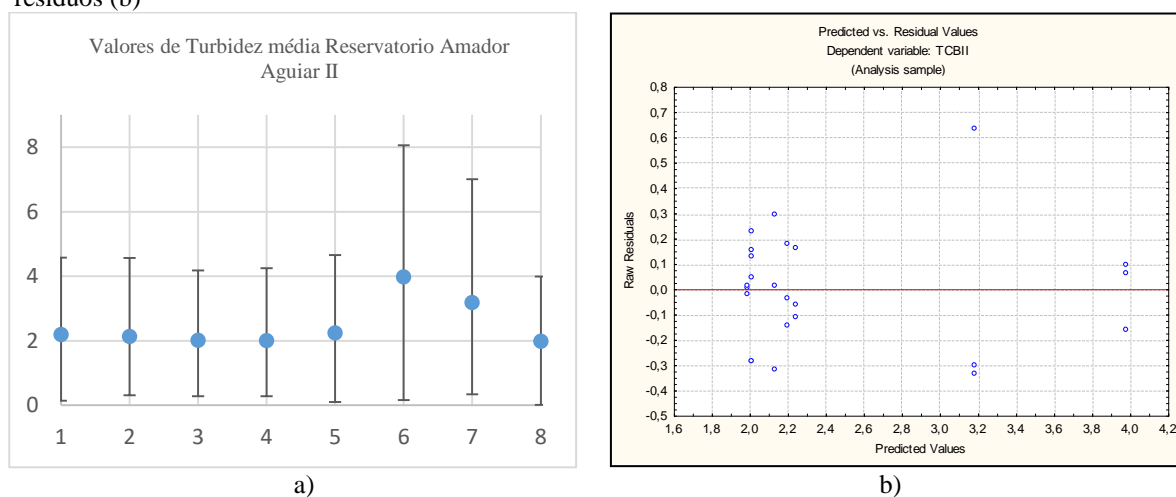


Gráfico 11 : Variações de medidas de turbidez nos reservatórios Amador Aguiar II (a) e análise de resíduos (b)

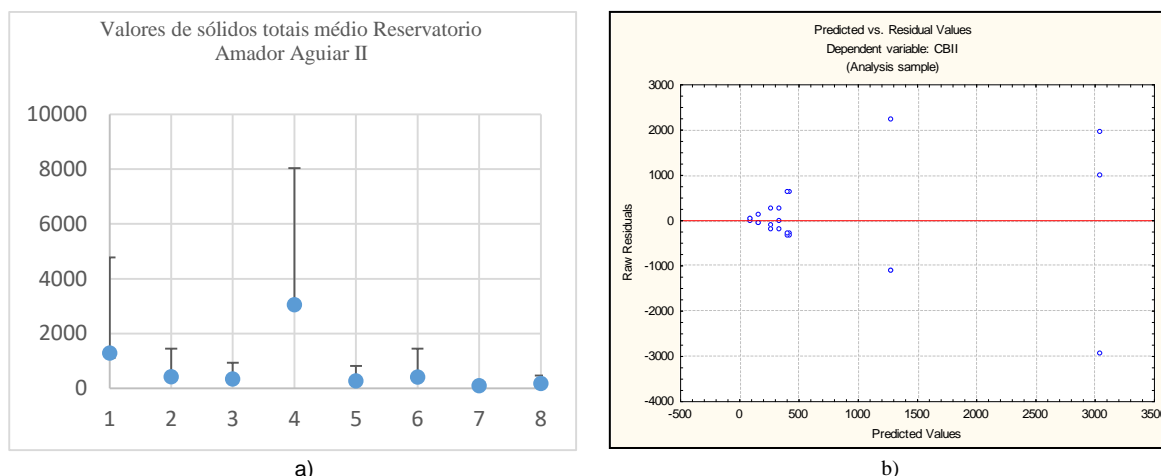


Gráfico 12 : Variações de medidas de turbidez nos reservatórios Amador Aguiar II (a) e análise de resíduos (b)

No gráfico 12 é possível verificar que os pontos 1 e 4 da medida de sólidos totais para o reservatório Amador Aguiar II apresenta variação muito grande em seus valores comparando com os restantes dos pontos, no gráfico (12b) é possível identificar que os resíduos estão mal distribuídos nos pontos, portanto, esses pontos serão desconsiderados na análise.

De acordo com a variação das repetições de medidas e dos pontos de coleta, foi verificado se essa variação de médias decorre de erros experimentais (não significativas) ou realmente essa variação pode ser considerada diferenças de valores ou incertezas de medidas, sendo assim, apresentam diferenças que possam ser consideradas significativas, foi aplicada a análise de variância (ANOVA) One Way (tabela 13) para cada um dos parâmetros analisados, com os resultados de sólidos totais e turbidez para cada um dos reservatórios, com nível de significância de 90%. O quadro da anova apresenta a média geral, a diferença entre as médias dentro do tratamento (repetições de medidas) e entre tratamentos (comparação com os outros pontos amostrais)

Tabela 13: Resultado da Anova para os parâmetros de turbidez e sólidos totais

Reservatório	Parâmetro	P ($\alpha=0,10$)	Média
Amador Aguiar I	Turbidez	0,017333	62,50054
	Sólidos Totais	0,903050	307662,5
Amador Aguiar II	Turbidez	0,000001	146,3228
	Sólidos Totais	0,096638	754,9751

Com o nível de significância de 90% e, portanto, $\alpha=0,10$, observa-se que o valor p está inferior nos resultados de turbidez em ambos os reservatórios, e por isso, as diferenças em suas médias são significativas, e as variâncias são heterogêneas, o mesmo ocorreu com os

valores de sólidos totais no reservatório Amador Aguiar I. Já a concentração de sólidos totais no reservatório Amador Aguiar II pode ser considerada homogênea, pois $\alpha < p$.

O quadro da Anova mostra se existe ao menos uma diferença entre as médias dos valores, no entanto. Não é possível identificar qual, ou quais valores apresentaram diferenças. Para identificação dos valores que apresentaram diferenças foi utilizado o teste de Turkey. Esse teste analisa as médias dos valores duas a duas e identifica aquelas que têm maiores diferenças, e separa em grupos (tabela 14). De acordo com a diferença entre as médias, na tabela 18 referentes aos resultados de sólidos totais, ao aplicar o teste formaram-se apenas um grupo cada, apesar da anova apontar diferença nos sólidos totais do reservatório Amador Aguiar I, no teste de Tukey essa diferença foi desprezada, pois o valor p (0,0966) se aproximou do valor de α (0,10), podendo, portanto, serem consideradas estatisticamente semelhantes.

Tabela 14: Teste Tukey HSD com variável Turbidez

Reservatório Amador Aguiar I				Reservatório Amador Aguiar II			
Pontos	Média	Grupo Tukey		Média	Grupo Tukey		
		a	b		a	b	c
1	2,08		****	2,197	****		
2	1,633	****	****	2,133	****		
3	1,447	****		2,013	****		
4	1,927	****	****	2,01	****		
5	1,523	****	****	2,247	****		
6	1,33	****		3,98			****
7	1,52	****	****	3,187		****	
8	1,45	****		1,987	****		

Tabela 15: Tukey HSD com variável sólidos totais

Reservatório Amador Aguiar I			Reservatório Amador Aguiar II	
Pontos	Média	Grupo Tukey	Média	Grupo Tukey
		a		a
1	108,444	****	3053,111	****
2	98	****	339,333	****
3	88,667	****	1280,667	****

4	89,778	****	418,444	****
5	151,111	****	171,778	****
6	129,556	****	98,889	****
7	120,667	****	408,222	****
8	119,556	****	269,333	****

Na Tabela 16 a média do ponto 1 é diferente e superior aos demais, embora se aproxime das médias dos pontos 7, 5, 2 e 4, contém diferenças com os pontos 6, 3 e 8. Já no reservatório Amador Aguiar II, os pontos 6 e 7 tem média superior e diferente dos demais ponto e são diferentes entre si, ocupando grupos diferentes, as demais médias (pontos 8, 4, 3, 2, 1 e 5) são estatisticamente semelhantes.

A partir do teste da anova, foram excluídos da análise os pontos que apresentaram diferenças dos demais, e média calculada pela anova passou a ser utilizadas nas análises. Após a aplicação da anova foi realizada novamente a de dispersão polinomial (tabela 16), que pode ser comparada com a tabela 10

Tabela 16: Valores de correlação da ordem 2 a 6, entre os resultados de sólidos totais e turbidez
R² algoritmo exponencial

Ordem	Amador Aguiar I	Amador Aguiar II
2	0,3619	0,2238
3	0,4531	1
4	0,4539	1
5	0,9924	1
6	1	1

Observa-se que o índice de correlação R² apresentou melhores resultados, pode-se considerar que os valores omitidos se devem ao erro amostral, é comum alguns valores apresentarem discrepância dos demais devido a algum fator externo no momento da análise, nesse aspecto quanto maior a quantidade de amostra, menores efeitos esses erros amostrais apresentam.

5.2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS IMAGENS DE SATÉLITE

A mesma análise foi utilizada para as imagens de satélite. Nessas imagens foram extraídos os valores dos pixels nas coordenadas de onde foram coletadas as amostras de água. A análise de arquivos em formato raster, cada informação é armazenada em pixels, que são

organizadas na forma de grades regulares com tamanho definido dependente da resolução espacial das imagens, pode apresentar a falsa ideia de que os valores mudam abruptamente (Durk, 2002), especialmente quando, de acordo com resolução espacial, o pixel representa uma área grande, não há como descartar que o valor do pixel é uma mistura de todos os elementos que ele recobre, portanto, quando mais próximos os pixels estão, há um risco maior de representarem elementos iguais, ou a mistura deles. Considerando também o erro médio que há no posicionamento do GPS foram analisados os pixels onde foram coletadas as amostras PC (pixel central) e os pixels vizinhos ao PC (Figura 22).

P2	P3	P4
P1	PC	P5
P8	P7	P6

Figura 22: coleta de informações nos pixels dos pontos amostrais de sólidos totais e turbidez

No reservatório Amador Aguiar II a coleta realizada no dia trinta de janeiro, foram comparadas as imagens do dia dezessete de fevereiro no caso da Landsat, na semana do dia dez de fevereiro foram as imagens do sensor Modis e a Sentinel no dia quatorze de fevereiro. A diferença entre as datas de coleta e as datas das imagens de satélite é devida a resolução temporal de cada sensor e a quantidade de nuvens, predominante nesse período chuvoso característico do sudeste do Brasil. E estas são algumas barreiras no uso do sensoriamento remoto com imagens de satélite de média resolução disponibilizadas gratuitamente, nem sempre é possível encontrar imagens de uma área em um determinado período.

Em cada banda dos satélites foram analisados o valor do pixel central da amostra e os pixels vizinhos (Figura 22), e comparados com os valores nos demais pontos, portanto, a Anova foi estruturada considerando os valores dos pixels de cada ponto (9 valores) como sendo a análise dentro de um tratamento e os valores dos demais pontos, como análise entre tratamentos. Os resultados indicaram que não há diferenças significativas para os valores de refletância entre eles, pois em todas as bandas $P < \alpha$ (tabela 17)

Tabela 17: Resultado da Anova para as bandas do Sentinel 2

B2	P= 0,00	Média: 0,0591473
----	---------	------------------

B3	P= 0,00	Média: 0,040328
B4	P= 0,00	Média: 0,032300
B8	P= 0,00	Média: 0,022756
B8A	P= 0,00	Média: 0,044641

Nas imagens Sentinel referentes aos pixels dos pontos de coleta no reservatório Amador Aguiar I, em todas as bandas os resultados indicaram que houve diferenças nos valores dos pixels que devem ser consideradas. Portanto foi aplicado o teste Tukey para verificar quais pontos apresentaram maiores diferenças (tabelas 18 a 22), nessas tabelas os pontos estão ordenados de acordo com a sua média em ordem crescente, da menor média para a maior.

Tabela 18: Tukey HSD; variável banda 2 Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I

Ponto	Média	Grupo Tukey			
		a	b	c	d
3	0,088389			****	
8	0,090033				****
6	0,091133	****			
2	0,091444	****	****		
1	0,091444	****	****		
4	0,091800	****	****		
5	0,091933	****	****		
7	0,092467		****		

Tabela 19: Tukey HSD; variável banda 3 Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I

Ponto	Média	Grupo Tukey			
		a	b	c	d
2	0,020444			****	
3	0,021556			****	****
8	0,022844				****
6	0,024411	****			
1	0,024433	****			
5	0,024767	****	****		
4	0,024956	****	****		
7	0,025922		****		

Tabela 20: Tukey HSD; variável banda 4 Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I

Ponto	Média	Grupo Tukey				
		a	b	c	d	e
2	0,017689		****			
3	0,018900			****		
8	0,020078				****	
6	0,021956	****				
4	0,022189	****				
1	0,022356	****				
5	0,022522	****				
7	0,023756					****

Tabela 21: Tukey HSD; variável banda 8 Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I

Ponto	Média	Grupo Tukey				
		a	b	c	d	e
2	0,015222					****
3	0,016222		****			
8	0,016511		****			
1	0,018133			****		
5	0,018189			****	****	
6	0,019033	****			****	
4	0,019167	****				
7	0,019744	****				

Tabela 22: Tukey HSD; variável banda 8A Sentinel-2A no reservatório Amador Aguiar I

Ponto	Média	Grupo Tukey				
		a	b	c	d	e
2	0,021500				****	
3	0,023356		****			
8	0,023856		****	****		
5	0,024311			****		
1	0,025256					****
6	0,026578	****				
4	0,027022	****				
7	0,027322	****				

Conforme as tabelas acima (18 a 22) a banda 2 do satélite Sentinel-2A, os pontos 8 e 3 apresentaram diferenças de valores com todos os grupos e entre ambos, os pontos 1, 2, 4, 5 e 6 são semelhantes e o ponto 7 é semelhante os do grupo b (1, 2, 4 e 5) e diferente do ponto 6. Na banda 3 do Sentinel-2A são semelhantes os pontos 1, 4, 5 e 6, pertencentes ao grupo a, e os pontos 4, 5 e 7 também podem ser considerados estatisticamente iguais. Assim como os pontos 2 e 3, 3 e 8. Para a banda 4 no reservatório Amador Aguiar I os pontos 1, 4, 5 e 6 podem ser considerados iguais, e os demais pontos (2, 3, 7 e 8) são todos com valores estatisticamente diferentes. Nas bandas 8 e 8A os pontos 4, 6 e 7 tem valores estatisticamente iguais entre si, assim como os pontos 3 e 8 também apresentam semelhança. Na banda 8 o ponto 1 e 5 são iguais, assim como o 5 e 6, e o ponto 2 apresenta valor de pixel mais baixos que os demais e sem semelhança com os outros pontos. Já na banda 8A o ponto que apresentou o menor valor foi o 2 o qual não teve semelhança de valor com nenhum outro. Observa-se que nas bandas 3 a 8 A o grupo de menores médias foram compostos dos pontos 2, 3 e 8, e em todas das bandas o ponto 7 apresentou a maior média.

O mesmo teste foi realizado para o satélite Landsat-8 nas bandas do azul, Verde, vermelho, IR e Pancromática. Os valores entre tratamentos se refere a comparação entre os pontos amostrais e dentro do tratamento se refere a comparação entre o pixel central e os pixels vizinhos.

Os resultados da anova para todas das bandas (2, 3, 4, 5 e 8) do satélite Landsat em todos os casos apresentaram $P=0,00$, indicando que não há diferenças entre os valores de refletância do ponto central com os pixels vizinhos. Embora foi possível observar a diferença entre a refletância média de cada banda (tabela 23)

Tabela 23: Resultado da Anova para as bandas do Landsat-8

B2	$P=0,00$	Média: 2,310323
B3	$P=0,00$	Média: 1,6444506
B4	$P=0,00$	Média: 1,151948

B5	P=0,00	Média: 0,967072
B8	P=0,00	Média: 0,1440942

Da mesma forma que as imagens Sentinel-2, as Landsat-8 também apresentaram hipótese nula entre os pixels da mesma banda, onde $p < \alpha$, portanto, há diferença em pelo menos uma média dos valores dos pixels entre os pontos de coleta. Segue a análise do teste de Tukey.

Tabela 24: Teste Tukey HSD; variável Refletância na Banda 2 do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar I

Pontos amostrais	Média	Grupo Tukey			
		a	b	c	d
P	0,178736	****			
P7	0,178776	****			
P2	0,178859	****			
P5	0,178903	****			
P4	0,179213				****
P1	0,179431		****		
P6	0,179515		****	****	
P8	0,179613			****	

Tabela 25: Teste Tukey HSD; variável Refletância na Banda 3 do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar I

Pontos amostrais	Média	Grupo Tukey			
		a	b	c	d
P7	0,150608				****
P3	0,150733				****
P2	0,151040	****			
P5	0,151063	****			
P8	0,151225	****	****		
P4	0,151385		****	****	
P6	0,151402		****	****	
P1	0,151586			****	

Tabela 26: Teste Tukey HSD; variável Refletância na Banda 4 do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar I

Pontos amostrais	Média	Grupo Tukey			
		a	b	c	d
P7	0,126187	****			
P2	0,126273	****			
P3	0,126305	****	****		
P5	0,126327	****	****		
P4	0,126524		****		****
P6	0,126656			****	****
P8	0,126804			****	
P1	0,126828			****	

Tabela 27: Teste Tukey HSD; variável Refletância na Banda 8 do satélite Landsat-8 - Reservatório Amador Aguiar I

Pontos amostrais	Média	Grupo Tukey			
		a	b	c	d

P7	0,140816			****
P3	0,141197	****		
P2	0,141263	****		
P5	0,141376	****		
P4	0,141499	****		****
P8	0,141747		****	****
P6	0,141824		****	
P1	0,142017		****	

Observa-se que os pontos 2, 3, 5 e 7 são significativamente semelhantes apresentando as menores médias, assim como os pontos 1 e 6, e 6 e 8 apresentando as maiores médias, e ponto 4 não se assemelha a nenhum outro. Na banda 3, os pontos 3 e 7 são significativamente semelhantes, assim como na banda 2 apresentam as menores médias, seguidas dos pontos 2, 5 e 8. O ponto 8 também não tem diferenças significativas com os pontos 4 e 6, sendo esses dois semelhantes ao ponto 1 apresentando as menores médias dentre todos os pontos. Na banda 4 os pontos 3 e 7 também são significativamente semelhantes com as menores médias do grupo, no entanto, o ponto 2 também faz parte de desse grupo de semelhança. Os pontos 3, 4 e 5 também são significativamente semelhantes, assim como os pontos 4 e 6, e as maiores médias são do grupo dos pontos 6, 8 e 1. Na banda 5 os pontos de menores médias continua sendo o 3, assemelhando com o ponto 5. Já o ponto 7 apresentou a segunda menor média, mas continua tendo semelhança significativa com o ponto 3. Os pontos 2, 4 e 8 também apresentaram médias significativamente semelhantes, assim como o ponto 2 e 1, e 1 e 6 apresentando as maiores médias. A banda 8 apresenta o ponto 7 como de menor média, dessa vez não se assemelhando com nenhum outro, a segunda menor média são nos pontos 2, 3, 4 e 5 todos esses significativamente semelhantes. O ponto 4 também se assemelha com o ponto 8 e este com os pontos 1 e 6 configurando as maiores médias dos grupos. Os resultados da variação entre os valores de refletância nos pontos centrais da coleta, para o reservatório Amador Aguiar I podem ser visualizados nos gráficos 13 a 20.

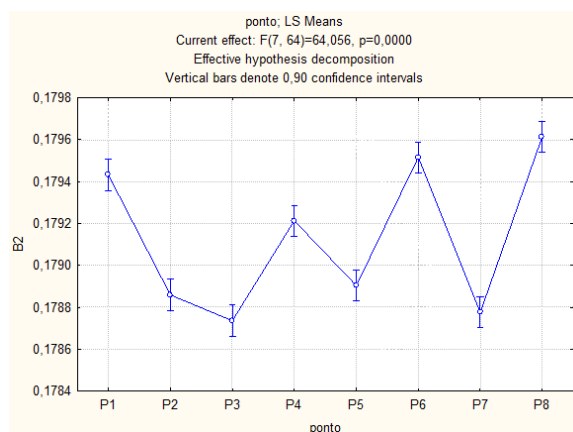


Gráfico 13: Variações de refletância na banda 2 do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I

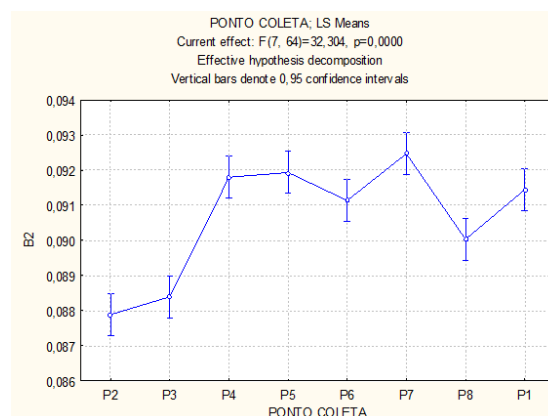


Gráfico 14: Variações de refletância na banda 2 do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar I

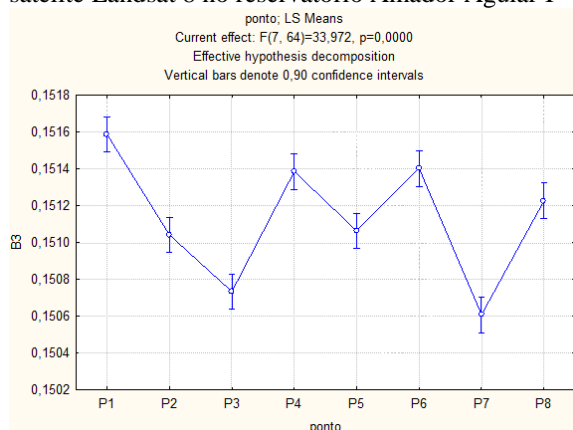


Gráfico 15: Variações de refletância na banda 3 do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I

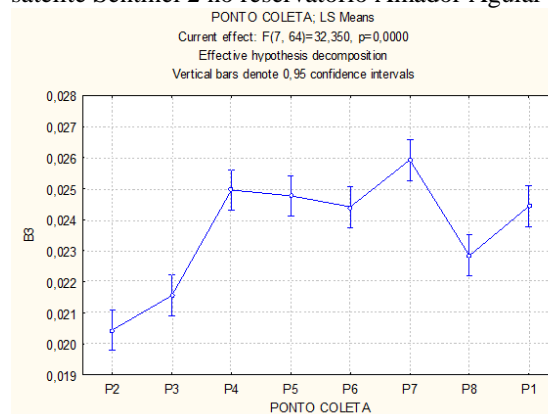


Gráfico 16: Variações de refletância na banda 3 do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar I

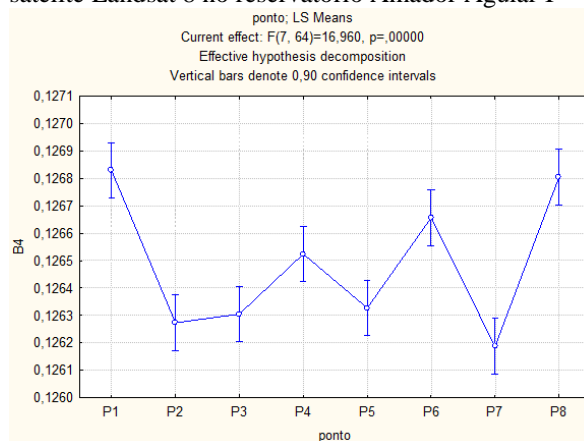


Gráfico 17 : Variações de refletância na banda 4 do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I

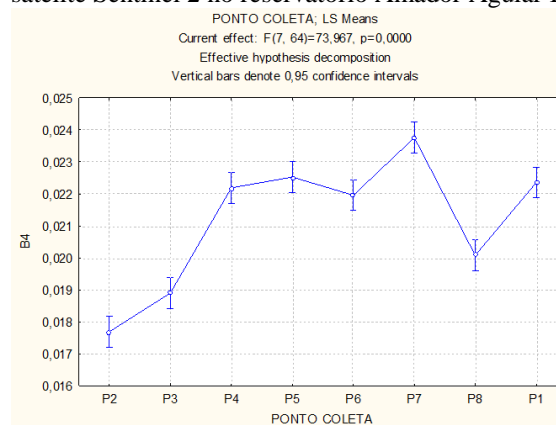


Gráfico 18: Variações de refletância na banda 4 do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar I

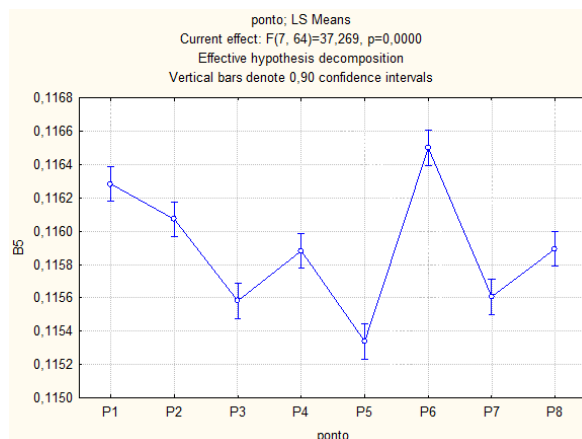


Gráfico 19: Variações de refletância na banda 5 do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I

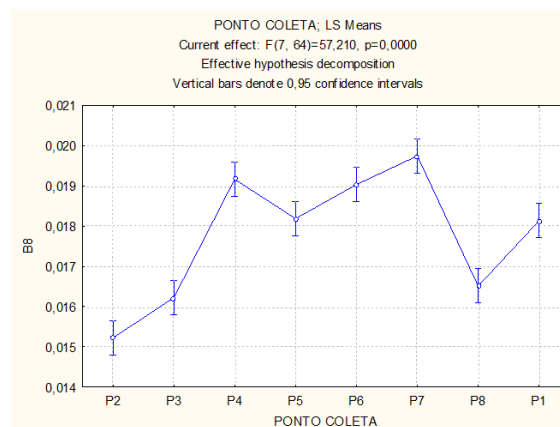


Gráfico 20: Variações de refletância na banda 8 do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar I

Apesar do teste de Tukey apresentar grupos de médias que são estatisticamente semelhantes, é possível notar que as diferenças entre as médias de um grupo para outro são relativamente baixas. Diante das diferenças entre os pixels vizinhos observados tanto nas imagens do satélite Sentinel-2 como no Landsat-8, foram analisadas as médias entre os pontos centrais, ou seja, o pixel de cada coordenada coletada em campo, no intuito de verificar se há diferenças que podem ser consideradas significativas entre os pontos amostrais.

Tabela 28: Análise de variância dos valores de pixels nos pontos centrais das amostras com os valores de refletância das bandas do satélite Landsat-8

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor F	Valor P
Entre bandas	0,019024	4	0,004756	101589,9	0,000000
Entre pontos amostrais	0,000003	7	0,000000	8,9	0,000009
Bandas x pontos amostrais	0,000001	28	0,000000	1,0	0,500000

Tabela 29: Análise de variância dos valores de pixels nos pontos centrais das amostras com os valores de refletância das bandas do satélite sentinel-2

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor F	Valor P
Entre bandas	0,002039	5	0,000408	538,9242	0,000000
Entre pontos amostrais	0,000077	7	0,000011	14,5602	0,000000
Bandas x pontos amostrais	0,000026	35	0,000001	1,0000	0,500000

Nas tabelas de anova 39 e 40, é possível verificar que há diferenças nas médias entre os valores das bandas e os pontos amostrais tanto no satélite Landsat $P=0,5$ (tabela 29) quanto no Sentinel $P=0,5$ (gráfico 22 e 23). Entre as bandas e entre os pontos amostrais, não houve diferenças ao nível de significância de 10%, comparados com todas as bandas (gráficos 21 e 22). No entanto, a análise de variância dentro das bandas que estão na mesma faixa

espectral com os pontos amostrais não houve diferenças estatisticamente comprovadas $P > 0,10$, quando associado às bandas nos oito pontos amostrais, conforme mostram os gráficos 23 e 24.

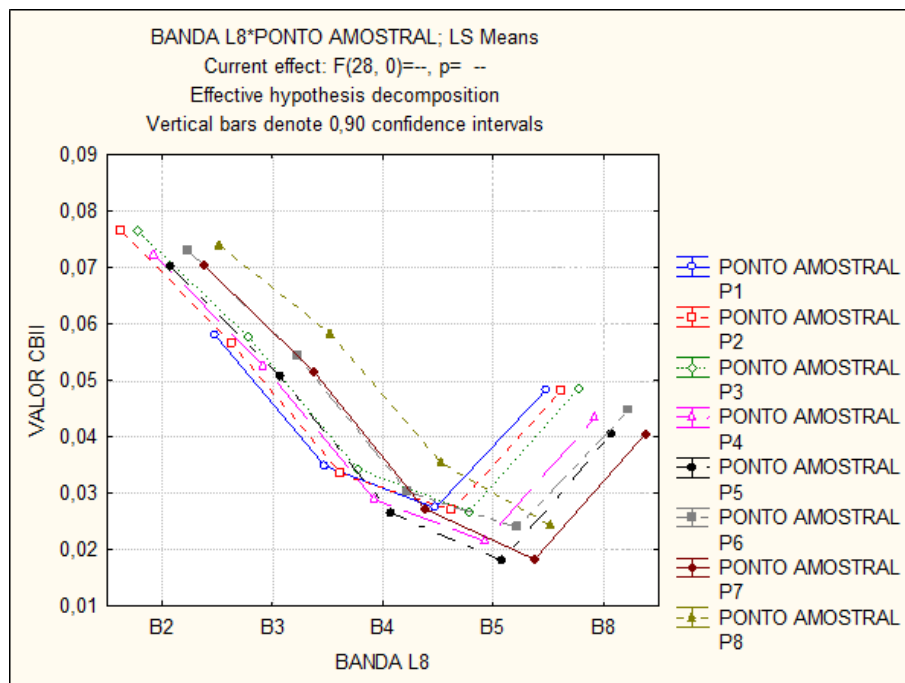


Gráfico 21: Variações de refletância das bandas do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar II

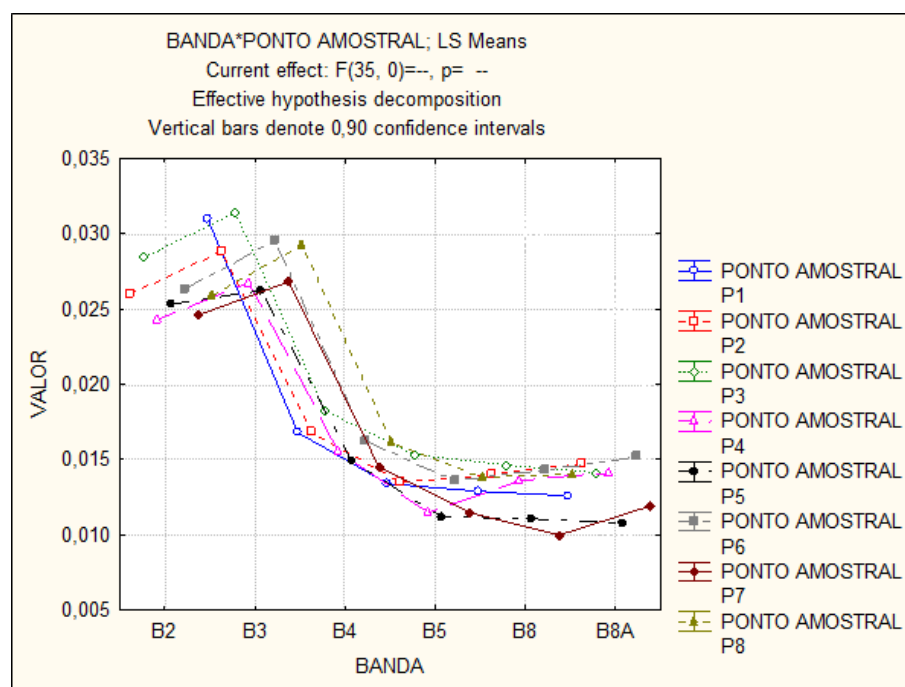


Gráfico 22: Variações de refletância nas bandas do satélite Sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar II

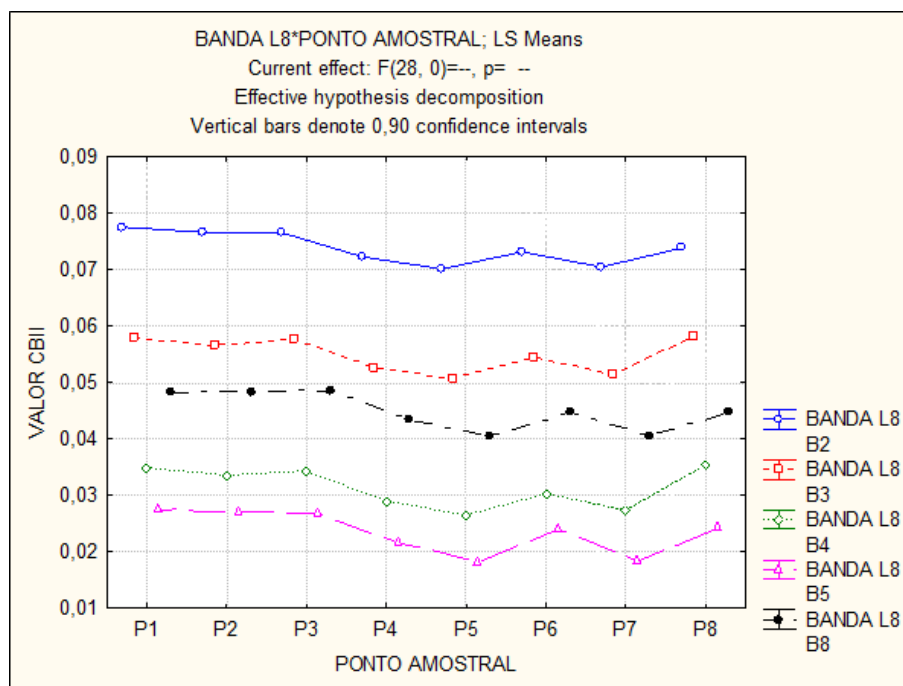


Grafico 23: Variações de refletância dos pontos amostrais nas bandas do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar II

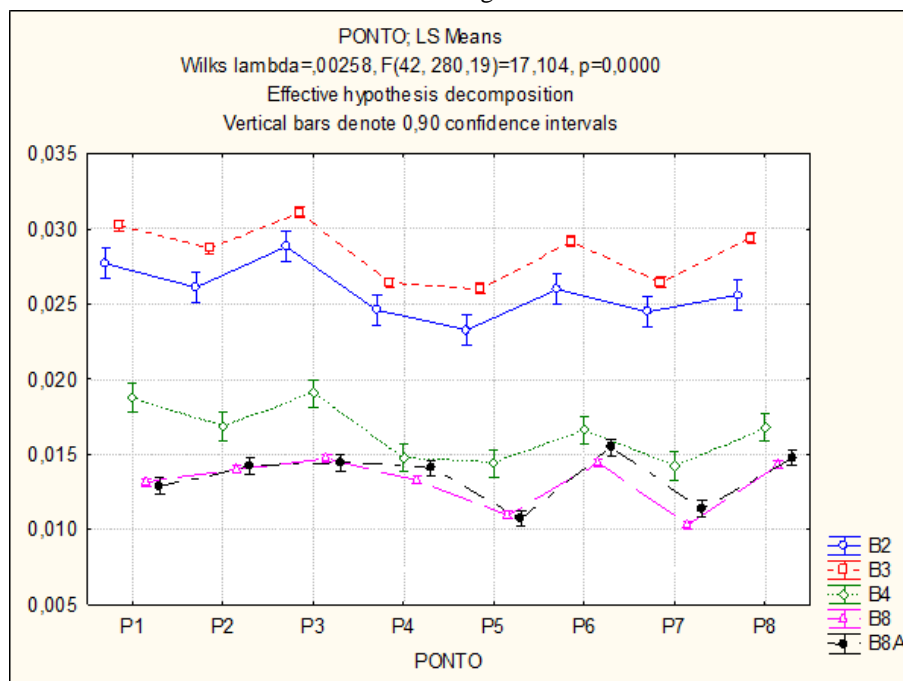


Grafico 24: Variações de refletância dos pontos amostrais nas bandas do satélite sentinel 2 no reservatório Amador Aguiar II

Ao comparar os gráficos 23 e 24, é possível visualizar que a água tem boa qualidade, as imagens do Landsat 8 teve uma variação de refletância maior do que as imagens do Sentinel 2. A banda pancromática do Landsat apresentou refletância média das demais bandas, pois

a banda pancromática abrange toda a faixa do visível. As bandas na região do Azul (B2) e Verde (B3) teve uma faixa e resposta bem delimitadas nos pontos amostrais (gráfico 23) sendo uma na faixa entre 0,07 a 0,08 e a outra na faixa de 0,05 a 0,06. Nas imagens do Sentinel 2 (gráfico 24) é possível verificar que as bandas do Azul (B2 e Verde (B3) podem ser confundidas, pois apresentaram refletâncias próximas (entre 0,025 e 0,030). O mesmo ocorreu para as bandas vermelho e infravermelho (B4 e B8) do Sentinel, onde em alguns pontos dessas bandas apresentam refletâncias próximas, e a banda Red-Ed4 (B8A) teve pouca diferença da banda vermelha. Nas bandas vermelha e infravermelho do Landsat8 também apresentaram pouca diferença de refletância mas seguiram o mesmo padrão nos pontos amostrais.

Foram construídos os diagramas de dispersão (gráficos 25 a 57), os valores de refletância como sendo a média do pixel central com os pixels vizinhos, também foram desconsiderados os valores de sólidos totais e turbidez que apresentaram diferenças significativas, neste caso, no reservatório Amador Aguiar I foi retirado o ponto 1 de turbidez e no Amador Aguiar II os pontos 6 e 7 também de turbidez, nos resultados de sólidos totais em ambos os reservatórios a análise de variância não apresentou diferenças que possam ser consideradas significativas, no entanto os pontos 1 e 4 do reservatório Amador Aguiar II apresentaram resultados acima do padrão dos demais pontos e estão fora dos valores de resíduos mostrados no gráfico 12b, o desvio padrão nesses pontos foram altos e por isso a análise de variância não apontou como sendo significativamente diferentes.

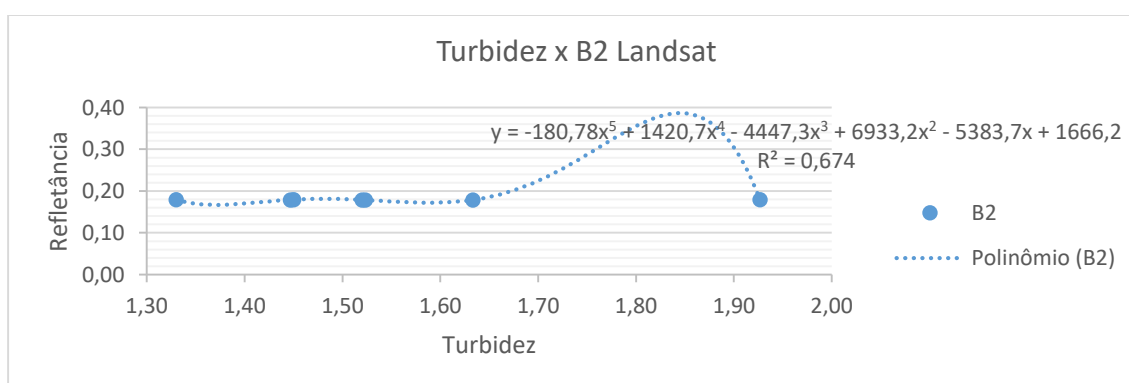


Gráfico 25: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do Landsat 8

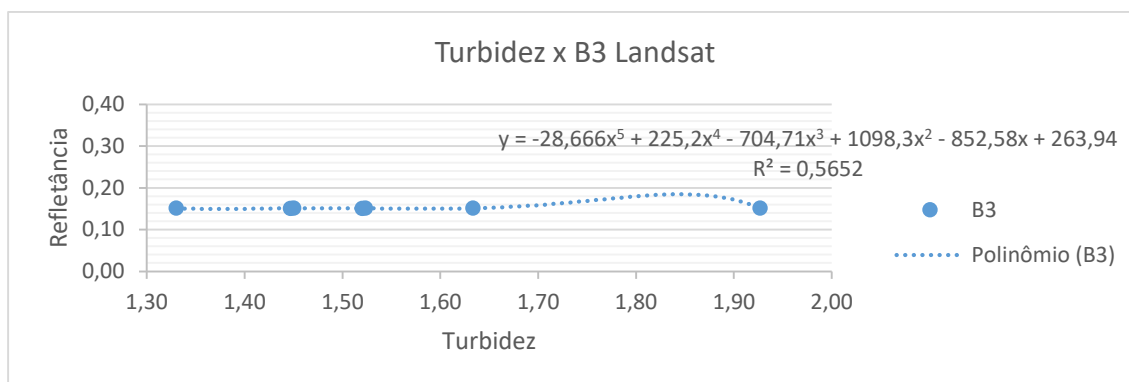


Gráfico 26: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 3 do Landsat 8

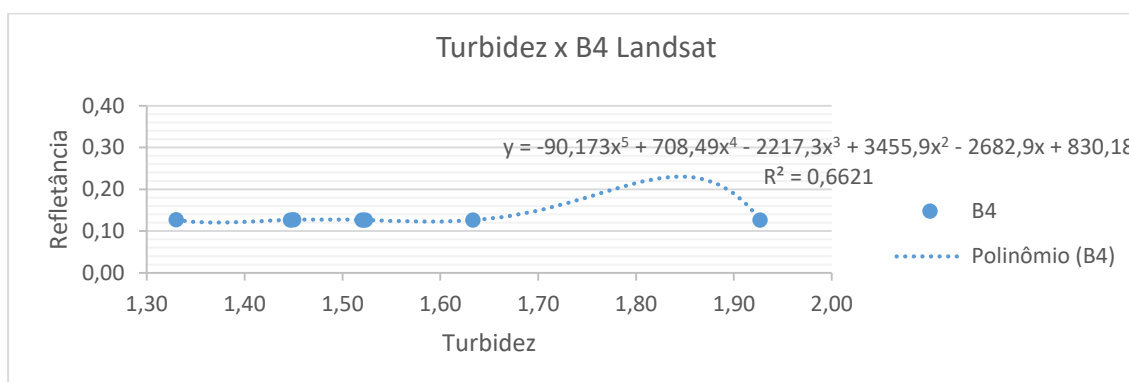


Gráfico 27: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 4 do Landsat 8

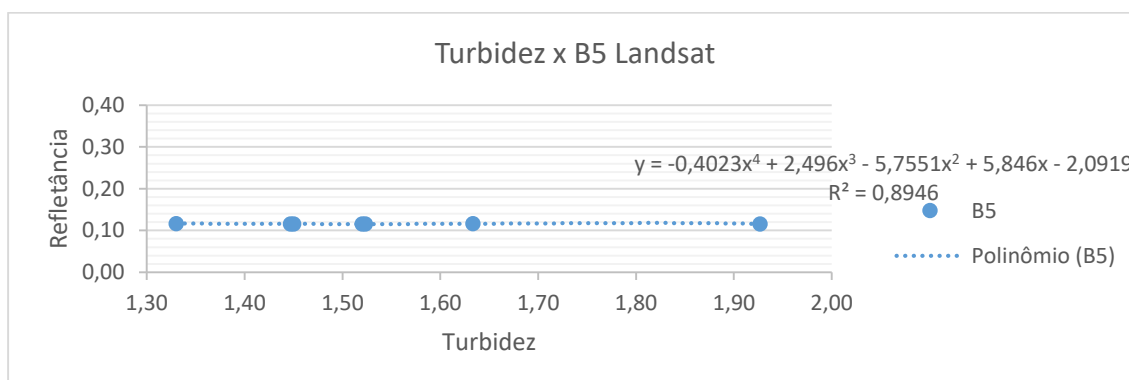


Gráfico 28: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 5 do Landsat 8

Na análise polinomial dos parâmetros de turbidez para as bandas do satélite Landsat (gráficos 25 a 28) a correlação é significativa na banda infravermelha a partir da terceira ordem, as demais bandas não apresentaram correlação polinomial satisfatória. No entanto, as bandas analisadas do Landsat apresentaram correlação linear negativa com a turbidez (tabela 41). Para as bandas do Sentinel 2 (gráficos 29 a 33) a correlação por ordem polinomial apresentou melhores índices comparado com o Landsat, com valores significativos a partir da quarta ordem, com exceção da banda 4 que apresentou correlação a partir da quinta ordem. E na correlação linear apresentou índice satisfatório em todas das bandas para a turbidez.

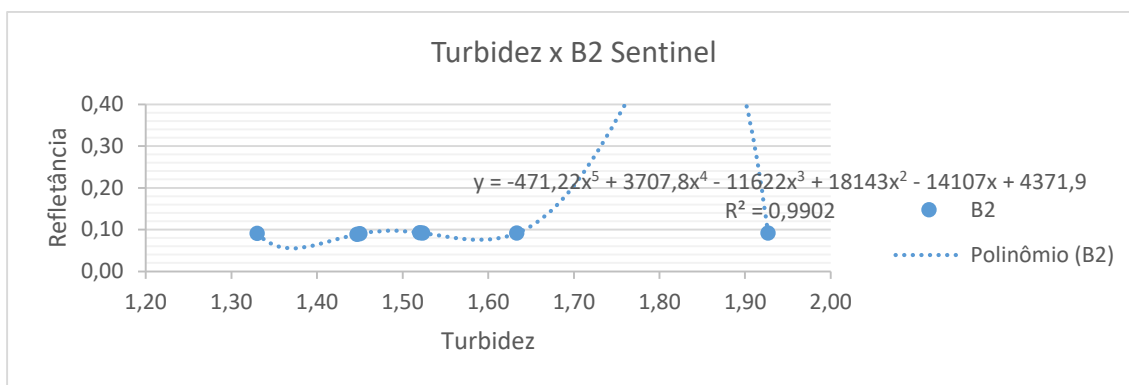


Gráfico 29: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do Sentinel 2

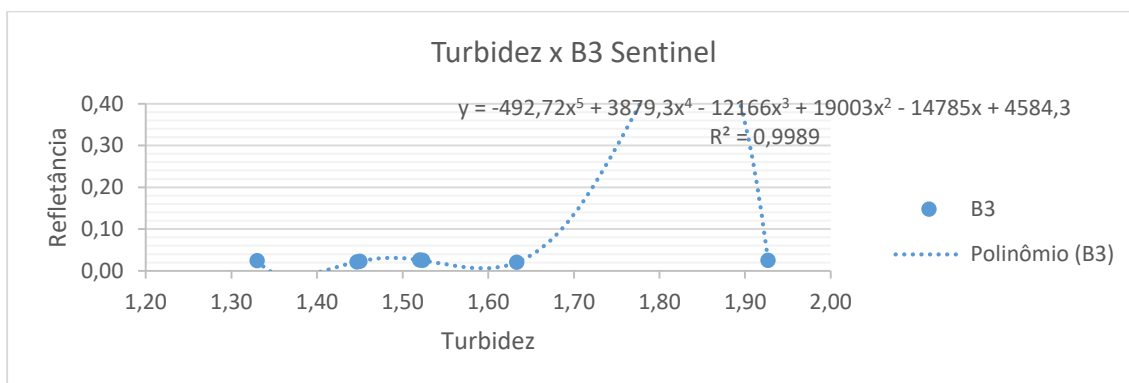


Gráfico 30: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 3 do Sentinel 2

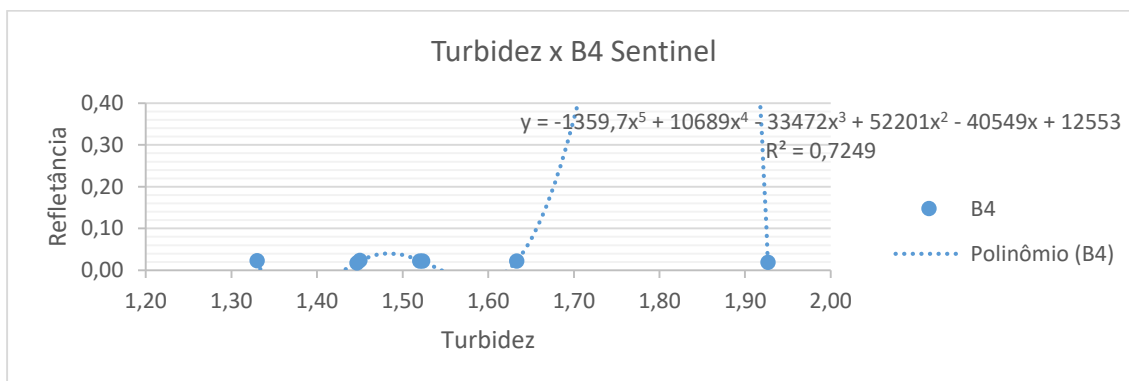


Gráfico 31: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 4 do Sentinel 2

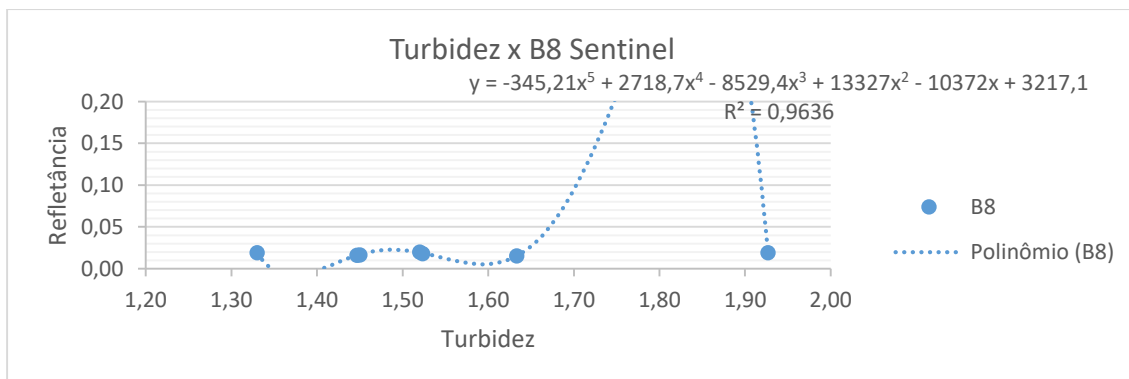


Gráfico 32: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 8 do Sentinel 2

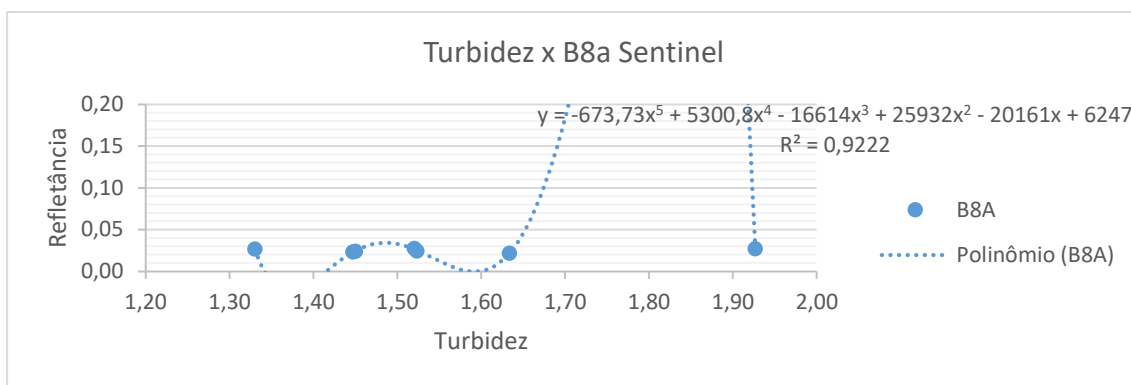


Gráfico 33: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de turbidez e banda 8A do Sentinel 2

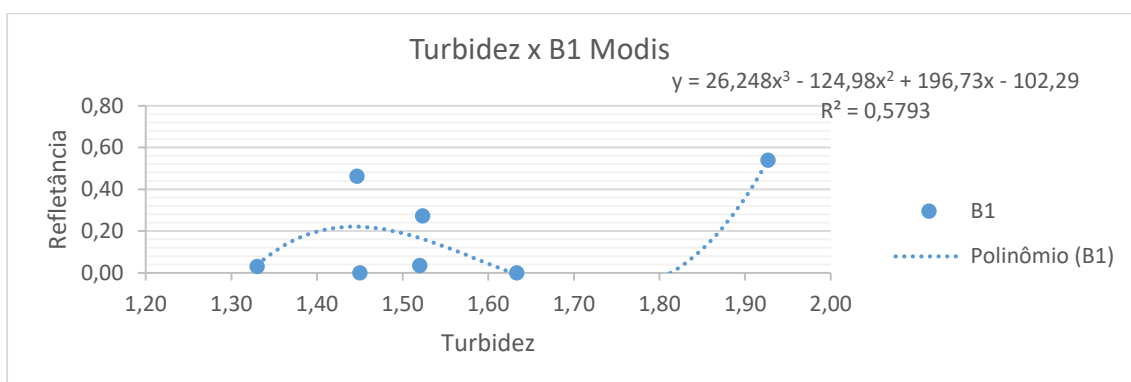


Gráfico 34: Polinômio de terceiro grau para os parâmetros de turbidez e banda 1 do sensor Modis

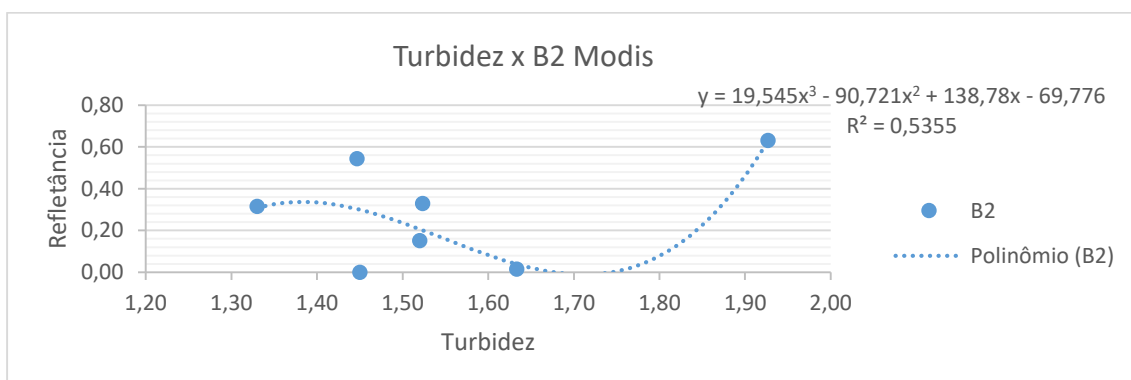


Gráfico 35: Polinômio de terceiro grau para os parâmetros de turbidez e banda 1 do sensor Modis

Para as bandas do sensor Modis foram aplicadas o modelo na ordem polinomial três (gráficos 34 e 35) na quarta ordem os valores de R^2 apresentaram pouca diferença com a terceira ordem, pois acima da quarta ordem a curva estava apresentando distorções elevadas. Na correlação linear essas bandas não apresentaram índices satisfatórios. Portanto, a equação que melhor explica a relação entre turbidez e a bandas do vermelho e infravermelho do Modis é a equação polinomial de terceira ordem.

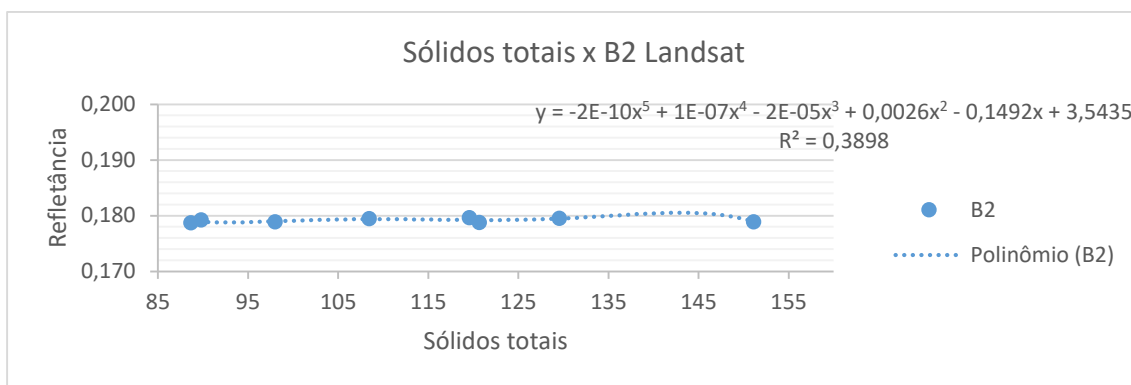


Gráfico 36: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do Landsat 8

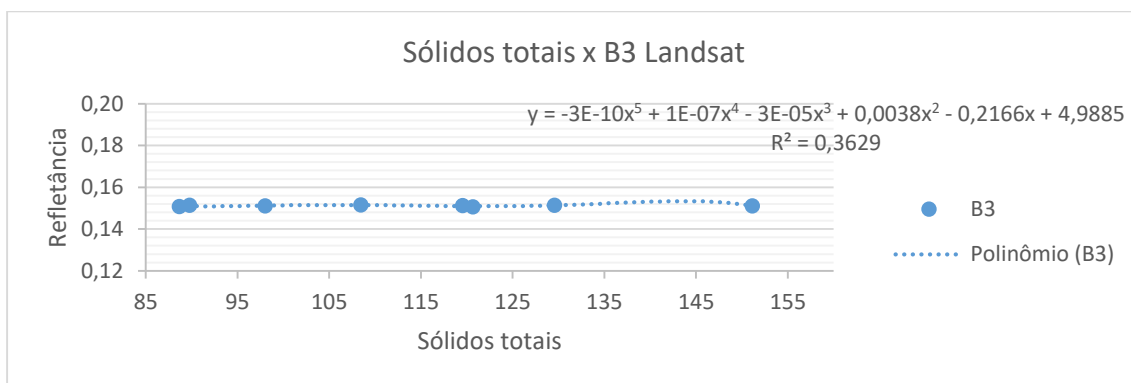


Gráfico 37: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 3 do Landsat 8

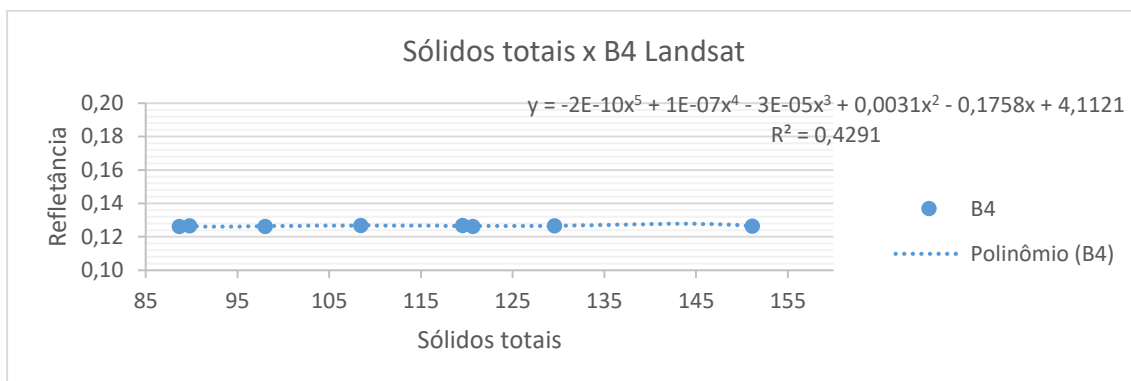


Gráfico 38: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 4 do Landsat 8

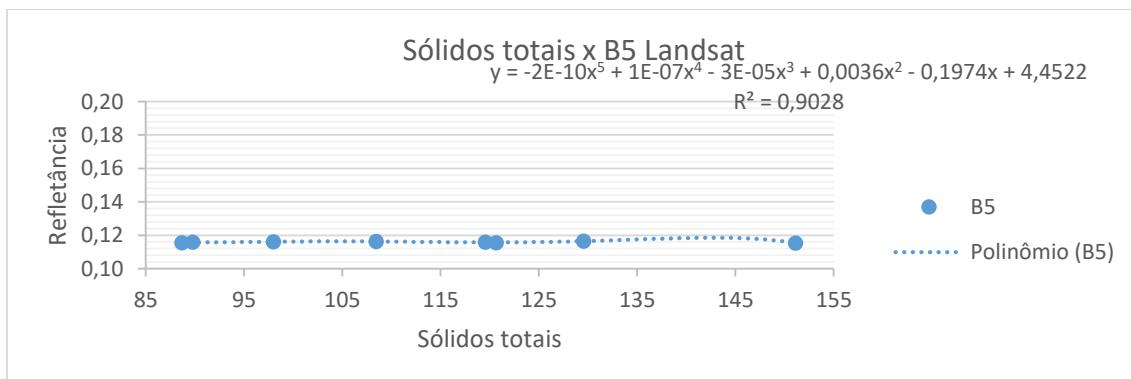


Gráfico 39: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 5 do Landsat 8

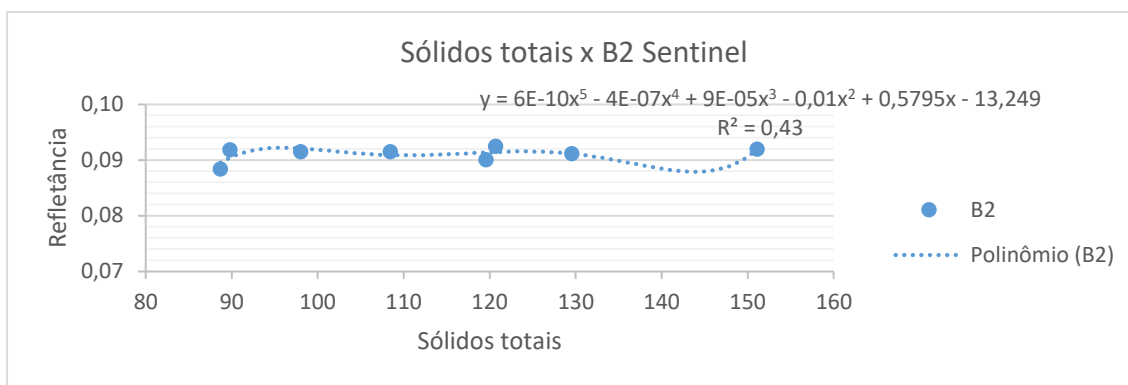


Gráfico 40: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do Sentinel 2

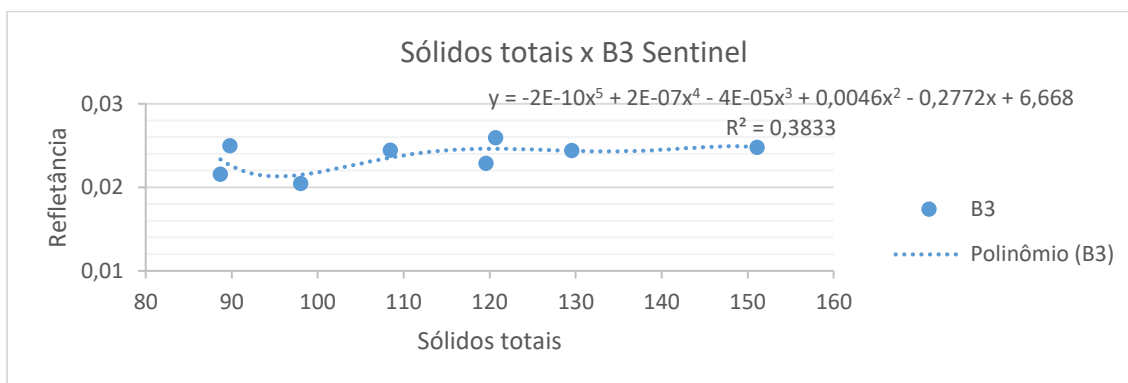


Gráfico 41: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 3 do Sentinel 2

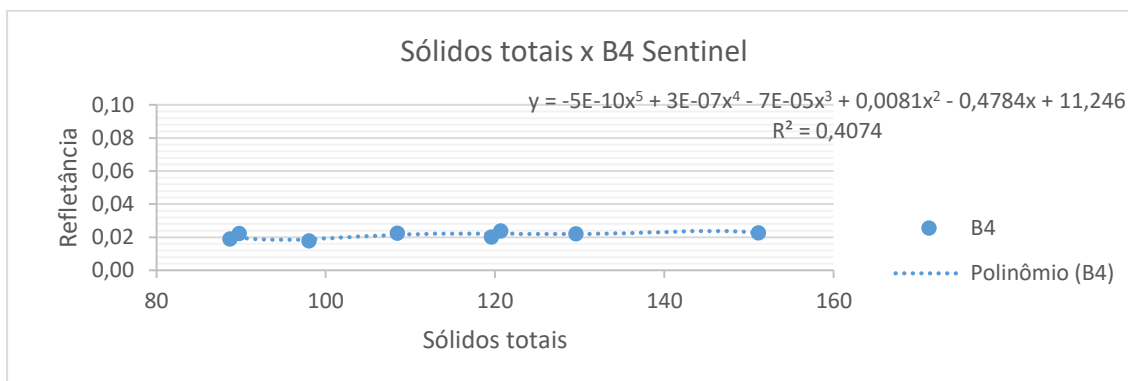


Gráfico 42: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 4 do Sentinel 2

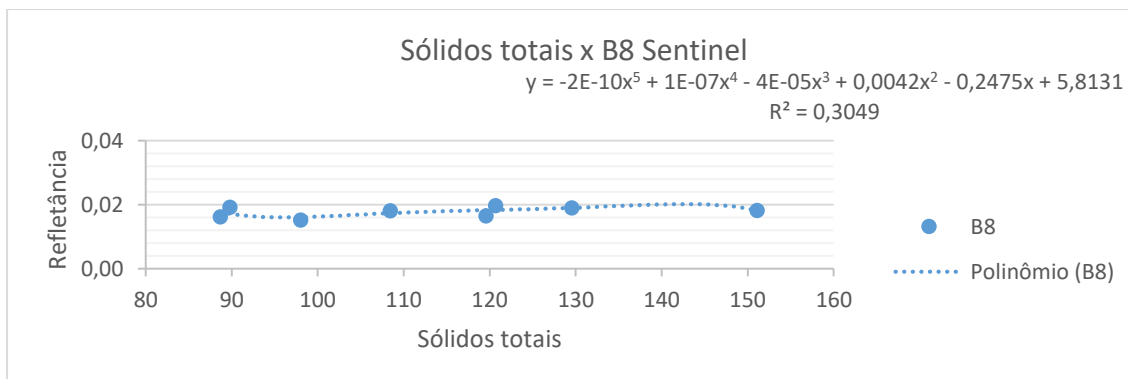


Gráfico 43: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 8 do Sentinel 2

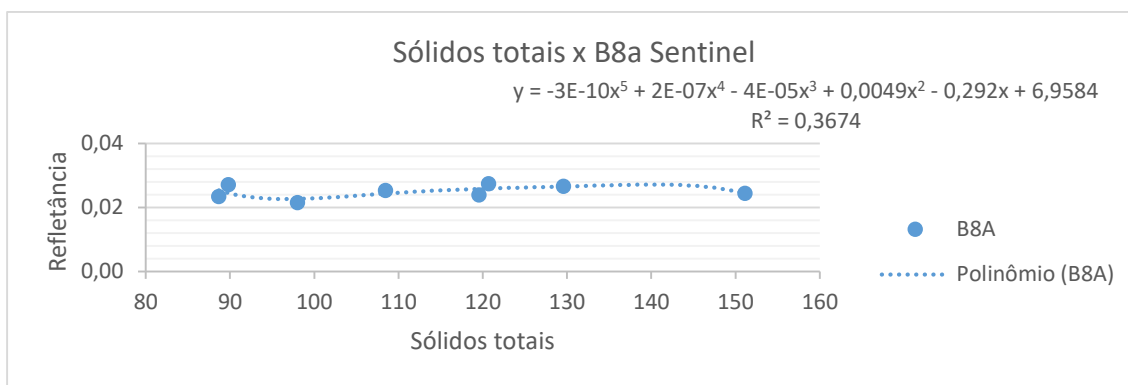


Gráfico 44: Polinômio de quinto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 8A do Sentinel 2

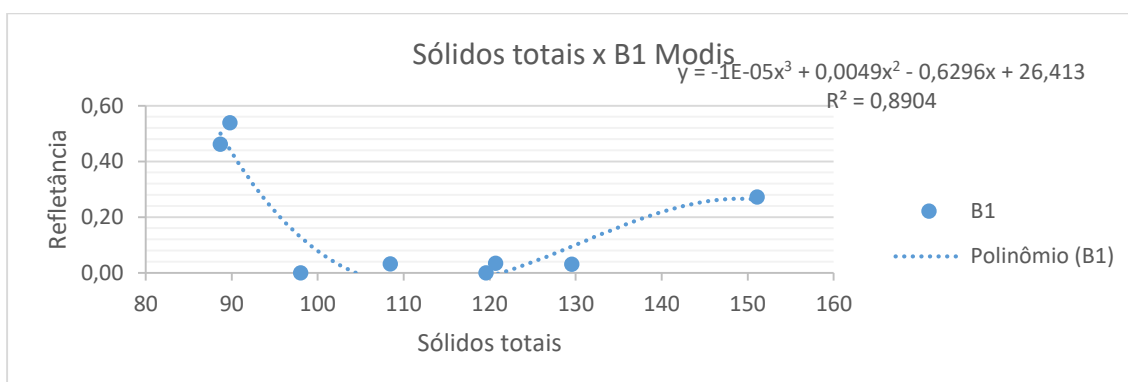


Gráfico 45: Polinômio de terceiro grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 1 do sensor Modis

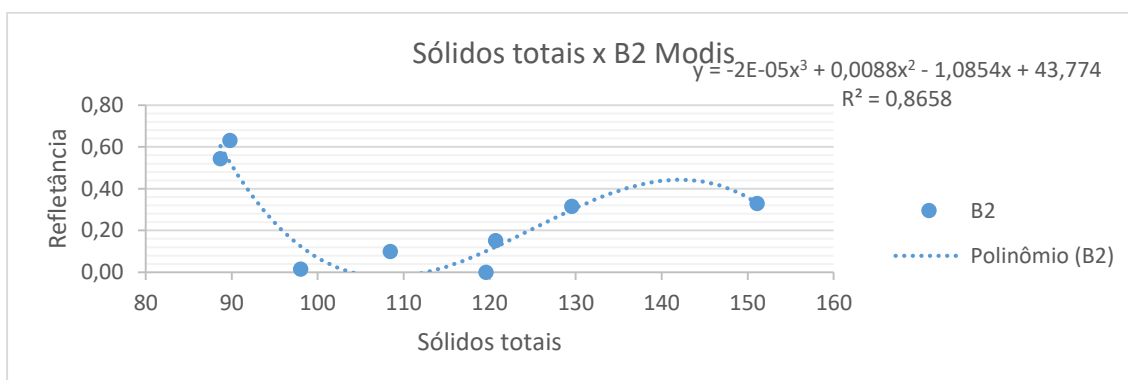


Gráfico 46: Polinômio de terceiro grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do sensor Modis

Para a análise dos sólidos totais no reservatório Amador Aguiar I nenhum ponto foi omitido, as bandas do sensor Modis foram analisadas com polinomial na ordem 3, maiores que isso estavam apresentando distorções grandes, ainda assim as bandas vermelho e infravermelho do Modis apresentaram coeficiente R^2 satisfatórios. Nas bandas do Sentinel 2 foram utilizadas as polinomiais na ordem 4 pois maiores também apresentaram distorções, no entanto, em todas as bandas nessa ordem não obtiveram coeficiente satisfatório. Nas bandas do Landsat 8 a ordem polinomial que melhor representou foi a 5, embora, nas bandas

analisadas apenas a 5 apresentou bons índices de correlação, os coeficientes foram aumentando gradativamente da banda 2 até a 5.

Nos índices de R^2 para sólidos totais do reservatório Amador Aguiar I as bandas 1 e 2 do Modis obtiveram valores acima de 0,8 na polinomial 3, enquanto as bandas do Sentinel não alcançaram 0,5 na polinomial 5, acima disso apresentam curvas discrepantes.

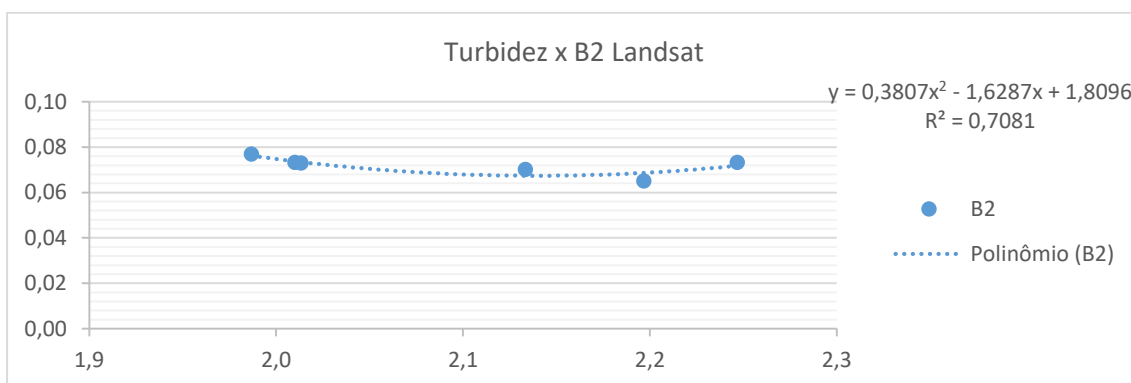


Gráfico 47: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do Landsat 8

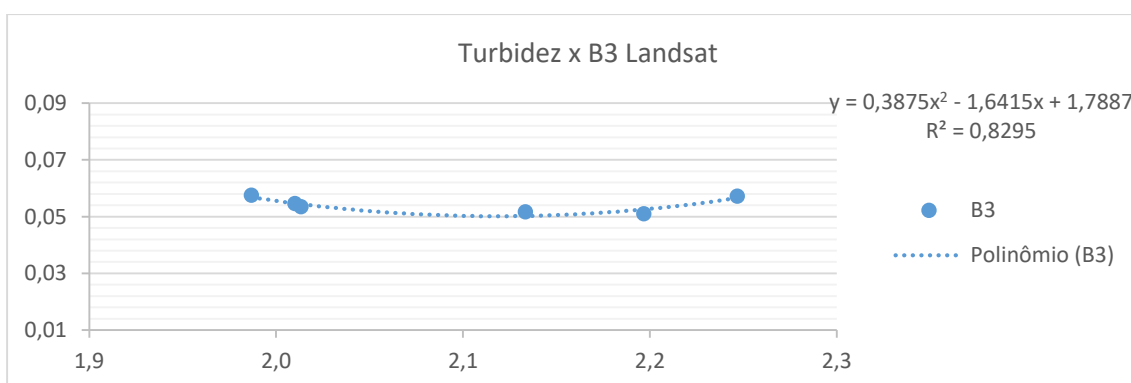


Gráfico 48: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 3 do Landsat 8

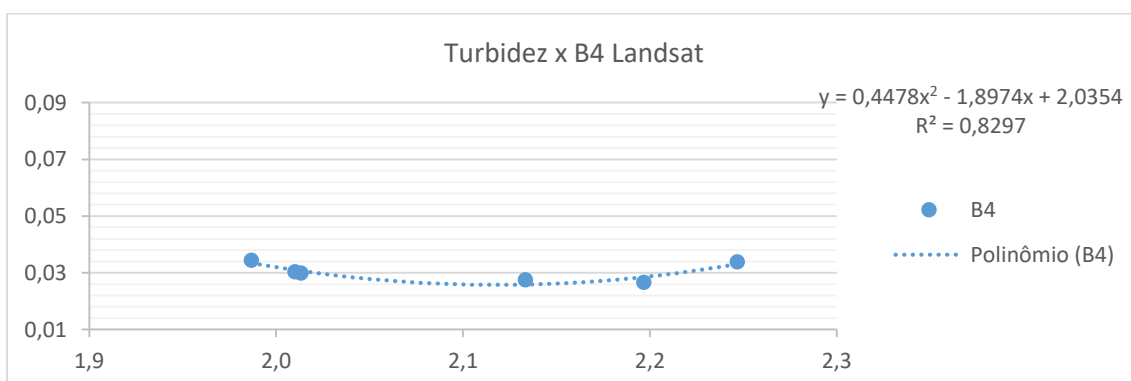


Gráfico 49: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 4 do Landsat 8

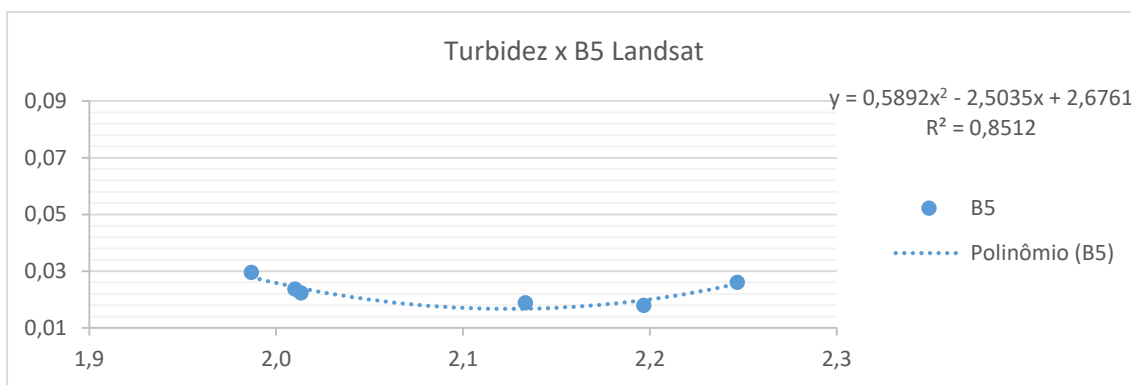


Gráfico 50: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 5 do Landsat 8

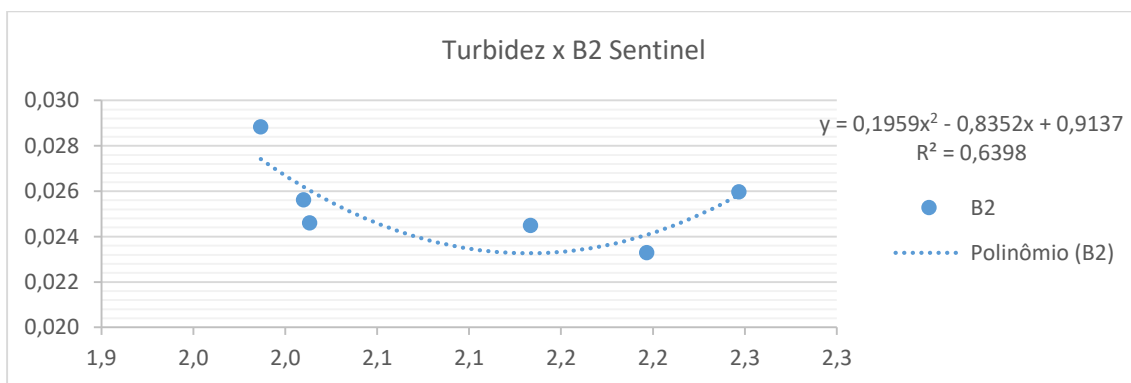


Gráfico 51: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do Sentinel 2

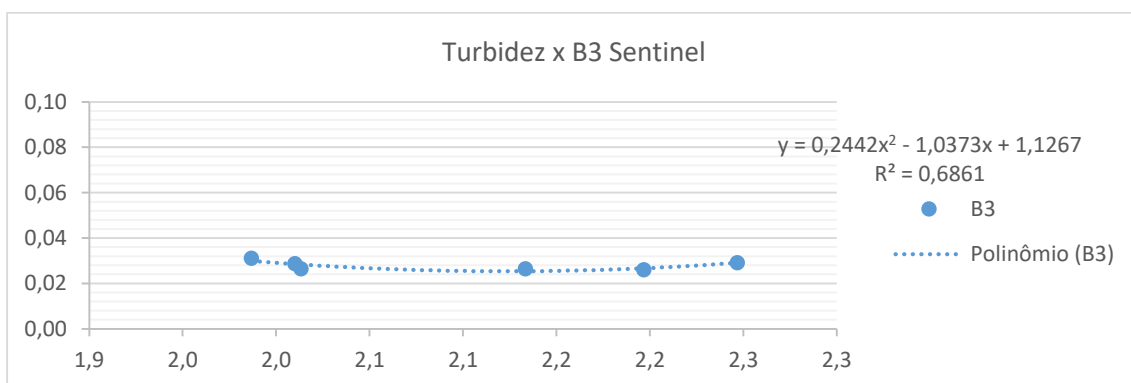


Gráfico 52: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 3 do Sentinel 2

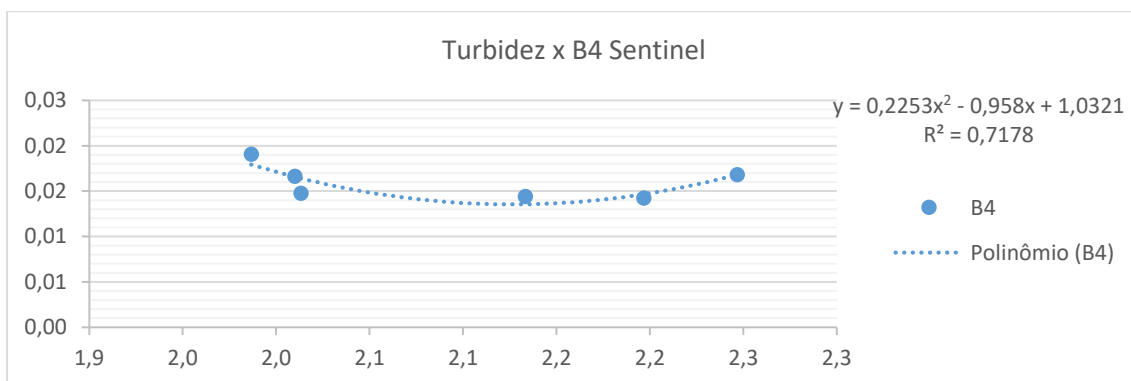


Gráfico 53: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 4 do Sentinel 2

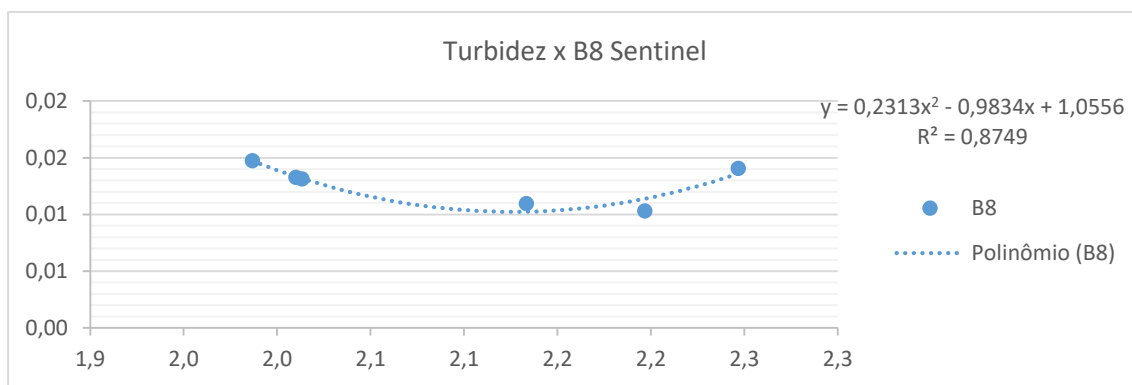


Gráfico 54: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 8 do Sentinel 2

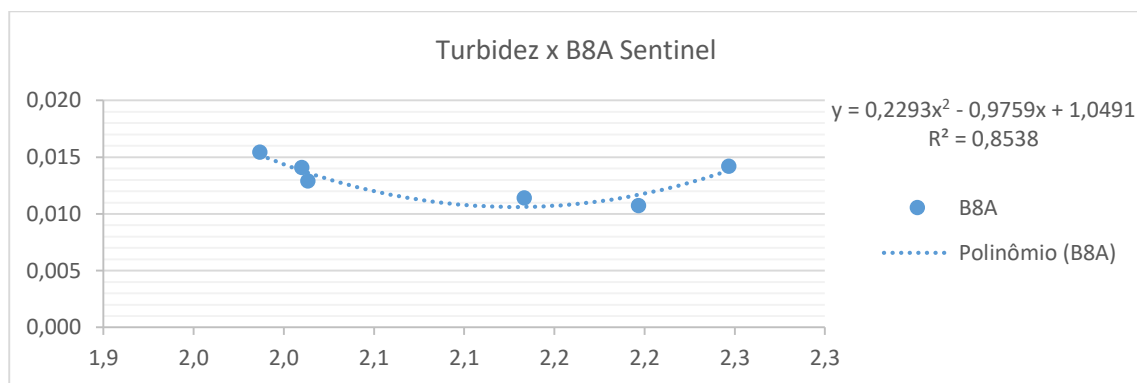


Gráfico 55: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de turbidez e banda 8A do Sentinel 2

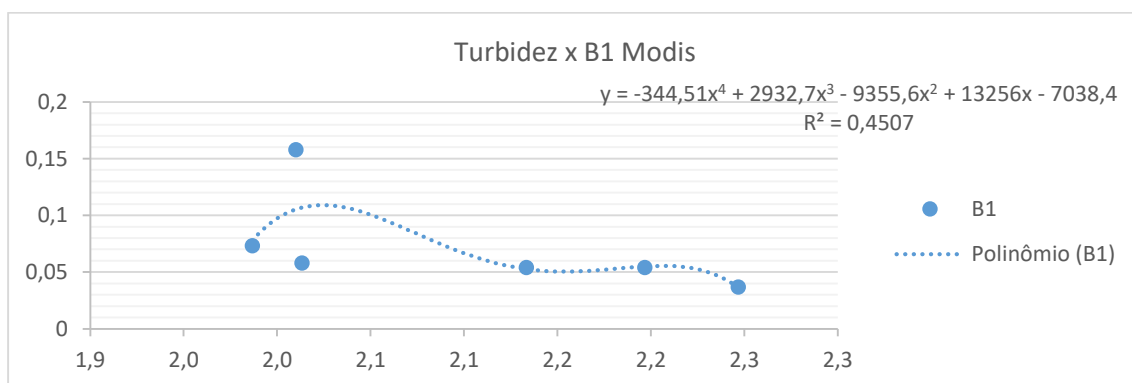


Gráfico 56: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de turbidez e banda 1 do sensor Modis

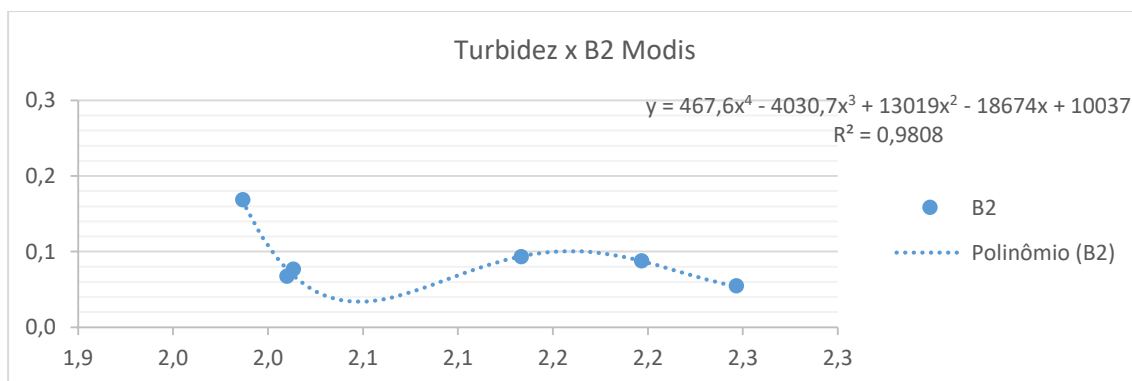


Gráfico 57: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de turbidez e banda 2 do sensor Modis

Na análise de turbidez no reservatório Amador Aguiar II os valores de R^2 foram maiores quando comparado com os resultados do Amador Aguiar I. Nas bandas dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2 o diagrama de dispersão de ordem polinomial 2 apresentou resultados de correlação satisfatórios, alcançando os valores de $R^2 = 0,8512$ na banda infravermelha do Landsat-8, e $R^2 = 0,8749$, na mesma faixa espectral, para o Sentinel 2. A banda vermelha e infravermelha do sensor Modis apresentaram R^2 mais baixos quando comparados com o Landsat (gráficos 49 e 50) e Sentinel (gráficos 53 e 54), é possível verificar o valor de R^2 na ordem 4, a banda do infravermelho próximo apresenta índice R^2 de 0,9808 (gráfico 57) enquanto a banda 1 apresenta R^2 de 0,4507 (gráfico 56) estando abaixo dos valores que podem ser considerados bons.

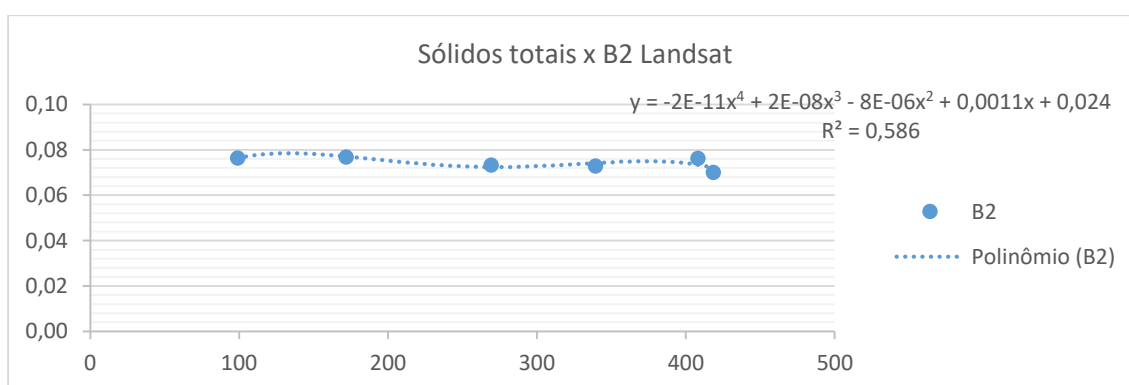


Gráfico 58: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do Landsat 8

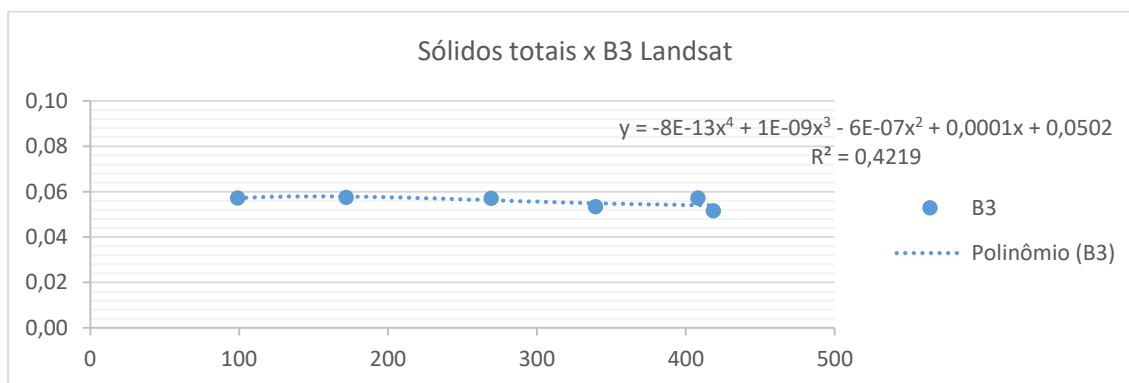


Gráfico 59: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 3 do Landsat 8

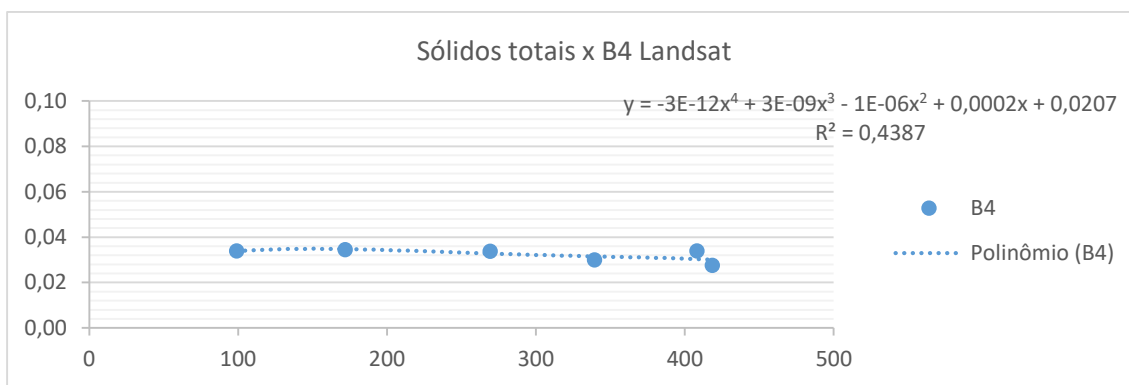


Gráfico 60: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 4 do Landsat 8

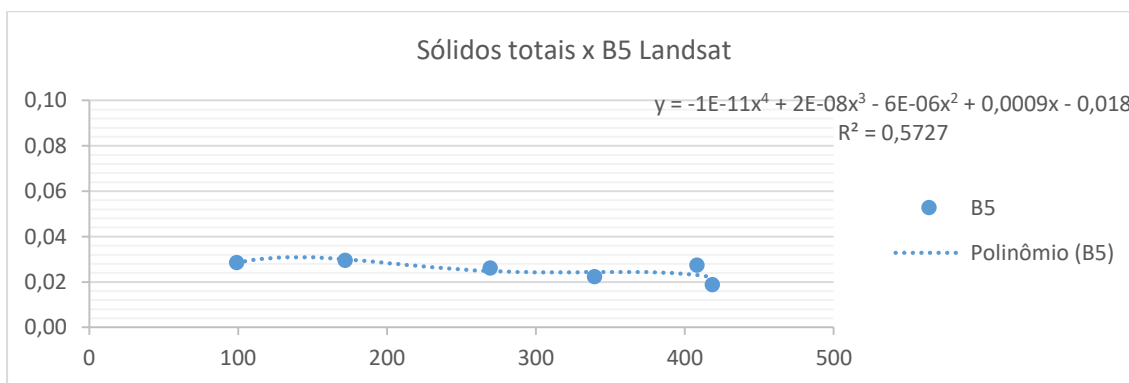


Gráfico 61: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 5 do Landsat 8

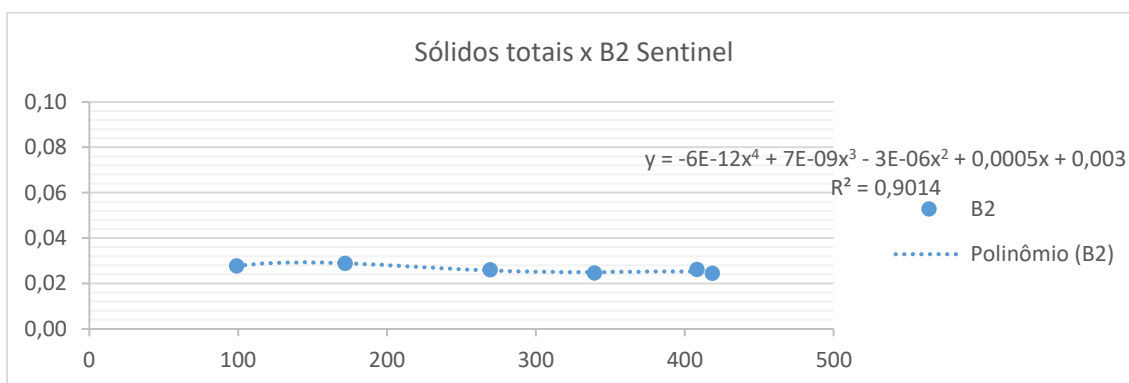


Gráfico 62: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do Sentinel 2

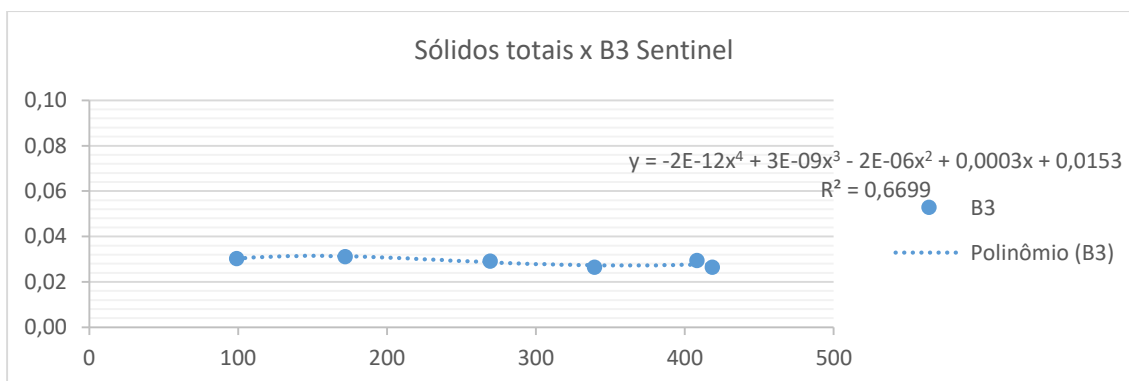


Gráfico 63: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 3 do Sentinel 2

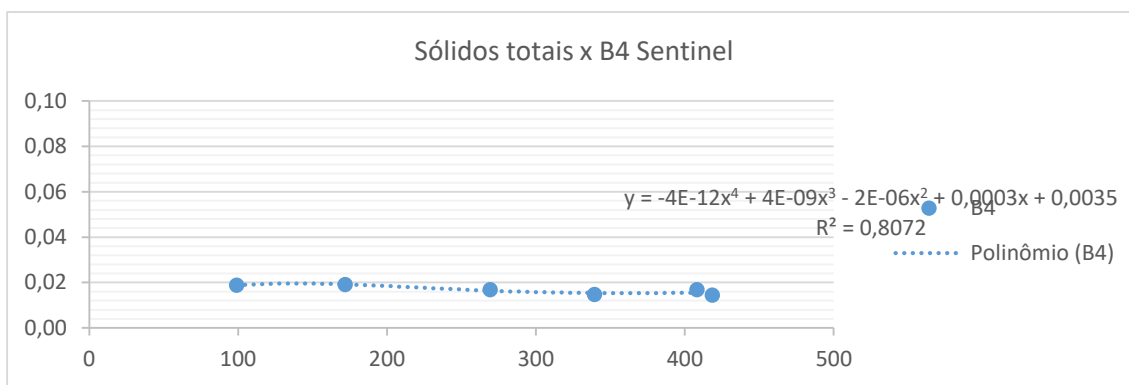


Gráfico 64: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 4 do Sentinel 2

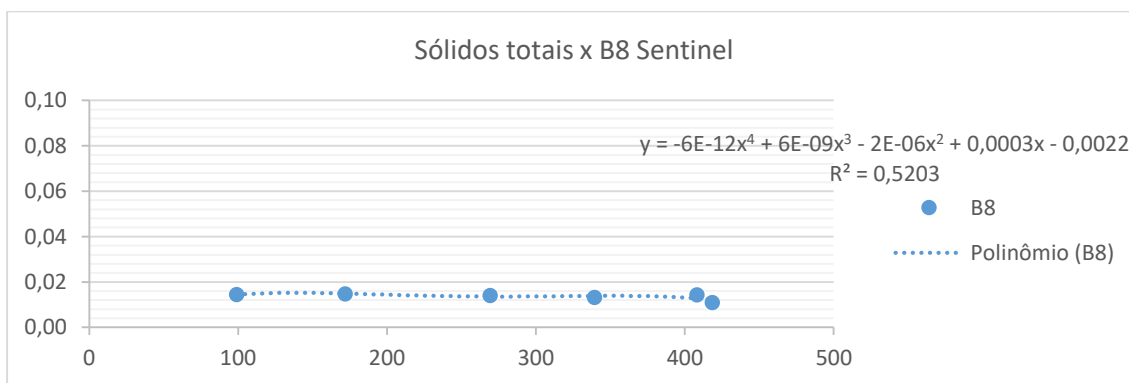


Gráfico 65: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 8 do Sentinel 2

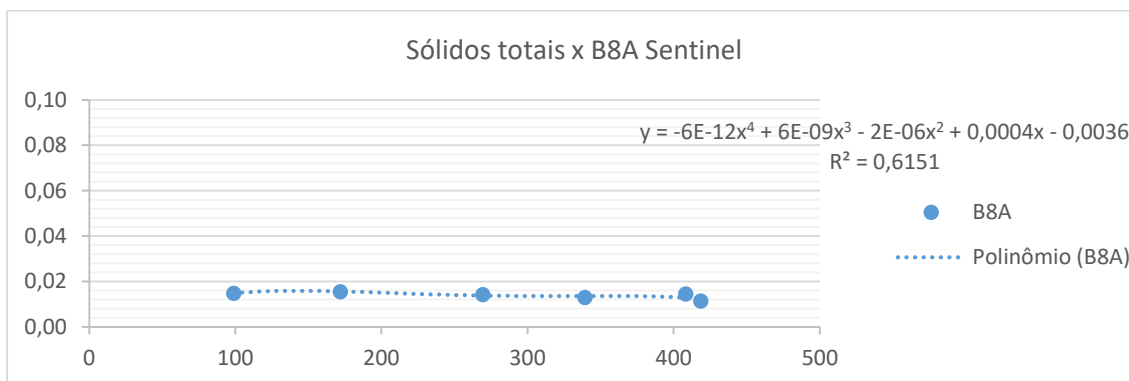


Gráfico 66: Polinômio de quarto grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 8A do Sentinel 2

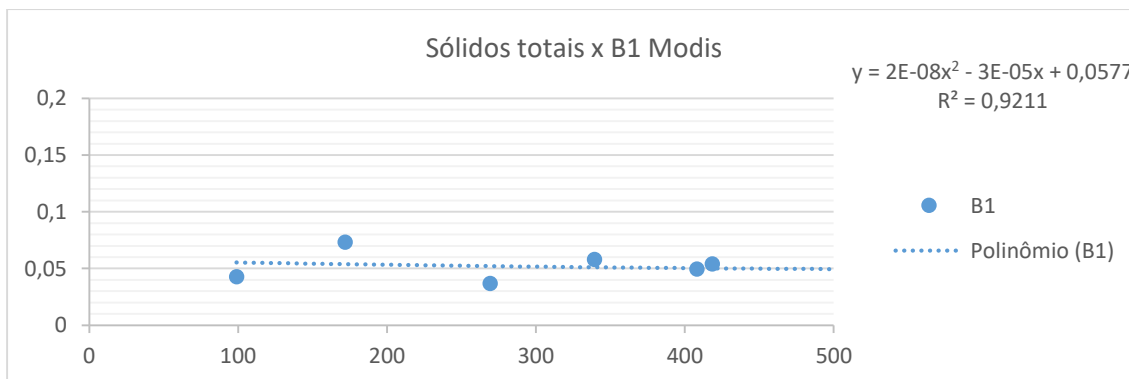


Gráfico 67: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 1 do sensor Modis

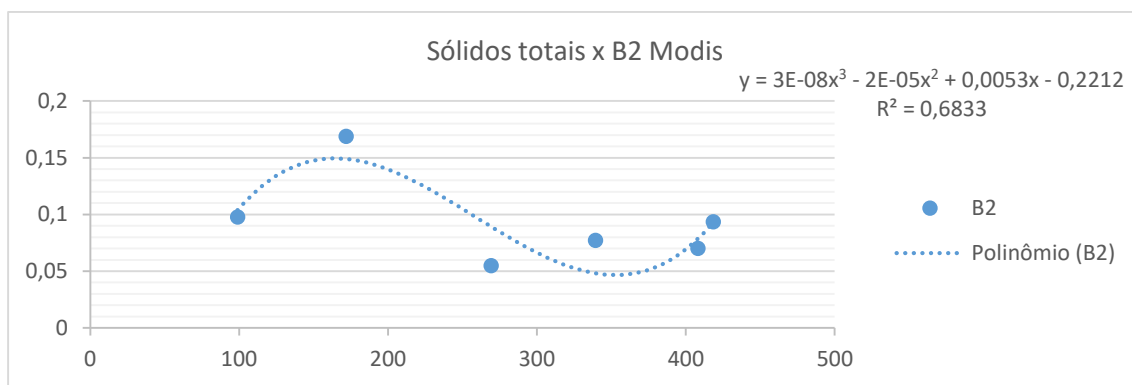


Gráfico 68: Polinômio de segundo grau para os parâmetros de sólidos totais e banda 2 do sensor Modis

Nos resultados de sólidos totais no reservatório Amador Aguiar II foi aplicada a análise polinomial de ordem 4, as bandas que apresentaram melhores coeficientes foram as bandas 2 e 4 do satélite Sentinel 2, a banda 1 do sensor Modis foi a que apresentou melhor coeficiente dentro desse grupo, com R^2 0,9211 na ordem 2.

Para melhor comparação dos resultados foi construído a tabela 30 com valores de R^2 para cada banda nas ordens polinomiais

Tabela 30: Resultados da correlação polinomial ajustada dos parâmetros de sólidos totais e turbidez e as bandas dos satélites Landsat, Modis e Sentinel

Turbidez											
Sentinel						Landsat				Modis	
Ordem	B2	B3	B4	B8	B8A	B2	B3	B4	B5	B1	B2
2	0,1576	0,1225	0,2075	0,2341	0,3622	0,4468	0,4969	0,4251	0,3904	0,3648	0,4288
3	0,2992	0,2106	0,3202	0,261	0,4151	0,4469	0,5797	0,4413	0,8178	0,5793	0,5322
4	0,8851	0,943	0,3689	0,9273	0,8345	0,4761	0,5898	0,5374	0,8946	0,5822	0,5457
5	0,9902	0,9989	0,7249	0,9636	0,9222	0,674	0,5652	0,6621	0,9722	0,9825	0,9412
6	0,676	0,9978	0,9972	0,9948	0,9939	13,23	4,836	22,759	-6,484	1	0,9997
Sólidos totais											
	B2	B3	B4	B8	B8A	B2	B3	B4	B5	B1	B2
2	0,1841	0,2327	0,265	0,1367	0,079	0,2818	0,149	0,127	0,3328	0,7928	0,5613
3	0,2962	0,286	0,2956	0,2772	0,3267	0,2989	0,3629	0,2473	0,3829	0,8904	0,8658
4	0,3459	0,3769	0,3887	0,2961	0,3603	0,304	0,149	0,2502	0,9174	0,9399	0,868
5	0,43	0,3833	0,4074	0,3049	0,3674	0,3898	0,3629	0,2537	0,9186	0,9414	0,8949
6	0,6378	0,6741	0,6394	0,5716	0,6646	0,7414	0,9031	1,0032	0,9962	0,9916	0,9533
Reservatório Amador Aguiar II											
Turbidez											
Sentinel						Landsat				Modis	
	B2	B3	B4	B8	B8A	B2	B3	B4	B5	B1	B2
2	0,6398	0,6861	0,7178	0,8749	0,8538	0,7081	0,8295	0,8297	0,8512	0,3498	0,2586
3	0,7019	0,7295	0,7795	0,9085	0,8599	0,7488	0,8318	0,8311	0,8546	0,3845	0,8382

4	0,9863	0,9071	0,9299	1	0,9693	1	0,9902	1	0,9969	0,4507	0,9808
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sólidos totais											
	B2	B3	B4	B8	B8A	B2	B3	B4	B5	B1	B2
2	0,6607	0,5075	0,6997	0,455	0,5298	0,3921	0,3993	0,4157	0,4966	0,0111	0,2383
3	0,8566	0,6652	0,7961	0,455	0,565	0,4051	0,4217	0,4353	0,5299	0,3005	0,6833
4	0,9014	0,6699	0,8072	0,5203	0,6151	0,586	0,4219	0,4387	0,5727	0,8779	0,9189
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Através da análise do diagrama de dispersão, após a aplicação da anova, são retirados os valores que apresentam maiores diferenças em suas médias, que estão fora do padrão dos dados. A análise de correlação polinomial apresentou melhores resultados quando considerados as médias dos pixels vizinhos, caracterizando influencia deles na refletância do pixel central da amostra, conforme é possível verificar comparando os gráficos acima com a primeira análise nos gráficos 8 e 9

Nos gráficos 69 e 70 é possível observar a variação da refletância nos oito pontos amostrais no reservatório Amador Aguiar I a variação entre os pontos são quase nulas para o satélite Landsat -8 e no Sentinel -2 ouve um pouco de variação, contudo, a refletância no Landsat-8 foi maior (0,10 a 0,17) enquanto no Sentinel-2 os valores de refletância foram menores (0,015 a 0,027). Portanto, cada ponto amostral no satélite Landsat ocupa uma faixa de resposta, enquanto no Sentinel-2 alguns pontos as faixas de resposta se confundem.

No reservatório Amador Aguiar II os valores de sólidos totais e turbidez foram maiores que no I, e nos gráficos 71 e 72 a variação da refletância foram maiores, embora a comparação entre o Landsat e o Sentinel seguiram o mesmo padrão que no Amador Aguiar I. As bandas do Azul nos dois satélites tiveram resposta próxima a banda do verde, o que não ocorreu no reservatório com menor turbidez.

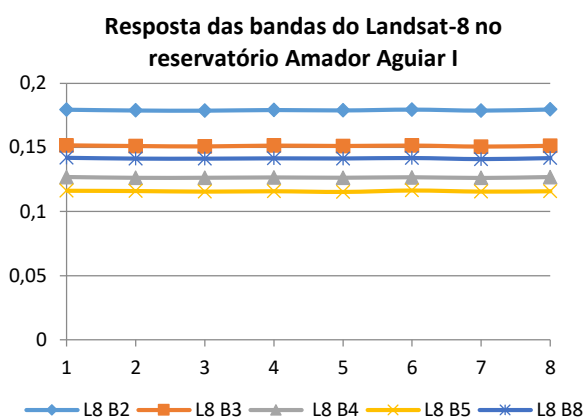


Gráfico 69: Valores de refletância das bandas do Landsat 8 nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I

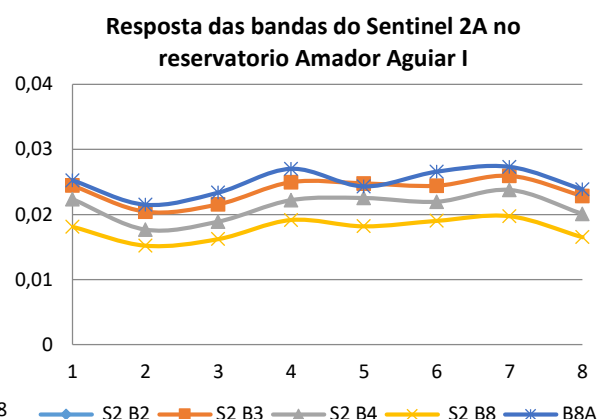


Gráfico 70: Valores de refletância das bandas do Sentinel 2 nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I

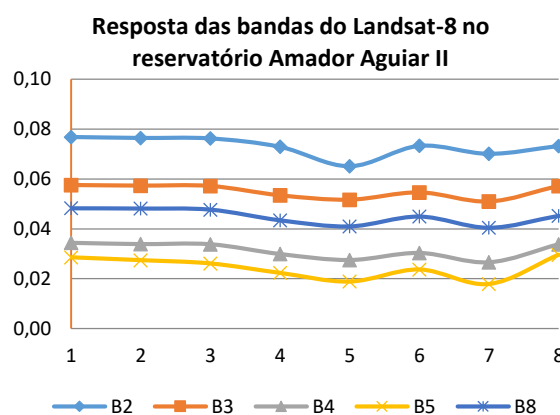


Gráfico 71: Valores de refletância das bandas do Landsat 8 nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar II

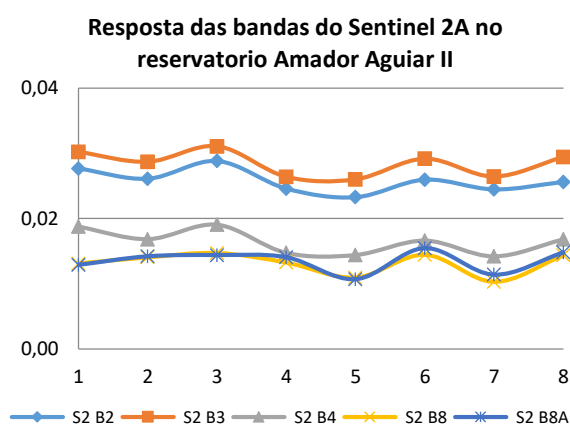


Gráfico 72: Valores de refletância das bandas do Sentinel 2 nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar II

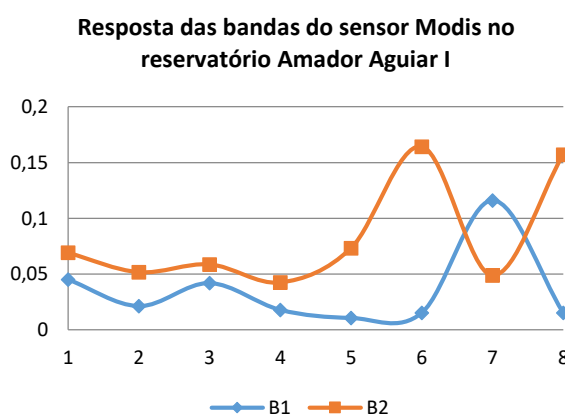


Gráfico 73: Valores de refletância das bandas do Sensor Modis nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I

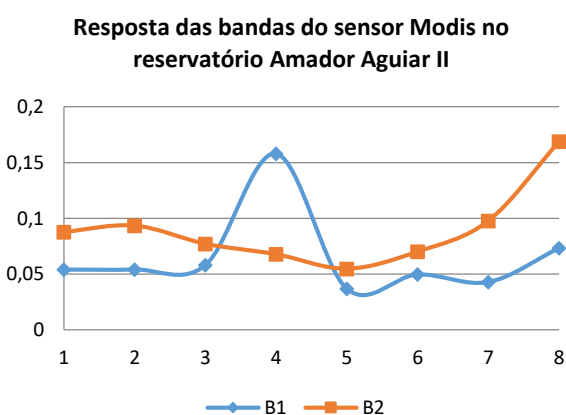


Gráfico 74: Valores de refletância das bandas do Sensor Modis nos oito pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I

As imagens do sensor Modis apresentaram grandes variações nos dois reservatórios, a banda um, correspondente ao espectro vermelho no reservatório Amador Aguiar II (gráfico 74) tem respostas maior quando comparado com o I (gráfico 73). No gráfico 73 o pico ponto 6 para a banda 2 se assemelhou com o alto valor de sólidos totais nesse ponto amostral. E no gráfico 74 o pico da banda 1 no ponto 4 também coincidiu com o pico de sólidos totais no ponto amostral 4. Indicando que apesar da resolução espacial de 250 metros esse sensor é capaz de indicar picos de sólidos.

5.3.MODELOS DA LITERATURA

Comparando com os modelos de Espinoza et al. (2012) e Robert et al. (2016), que testaram as bandas do vermelho e infravermelho próximo para estimar a concentração de sólidos na água, foi aplicada a matemática de bandas entre elas para as imagens do Modis, Landsat e Sentinel. No caso do Sentinel que possuem faixas espectrais no infravermelho mais estreitas, foram aplicadas a ele, além da NIR/RED, a RED-ED4/RED.

Embora, nas análises das bandas apontaram que para os reservatórios do complexo Capim Branco apresentam maiores respostas nas bandas do azul, indicando que possuem baixa concentração de sólidos totais e de turbidez. A matemática de bandas é aplicada no intuito de realçar diferenças entre as bandas, é realizada por meio de softwares de geoprocessamento na calculadora raster.

Nesta pesquisa foram aplicadas as razões entre as bandas infravermelho, no numerador, e a banda vermelha no denominador. Dessa forma quanto maior o resultado indica maiores diferenças entre as bandas. Em sensoriamento remoto essa função é utilizada no realce de objetos. A utilização das bandas do espectro vermelho e infravermelho se deve por serem faixas espectrais sensíveis para captar sólidos.

O processo da razão entre as bandas foi aplicado em todos os pontos de coleta considerando os pixels vizinhos, e posteriormente foram aplicadas a análise de variância para todas as imagens estudadas, com o intuito de verificar se as diferenças entre os valores resultantes podem ser consideradas significativas ou não.

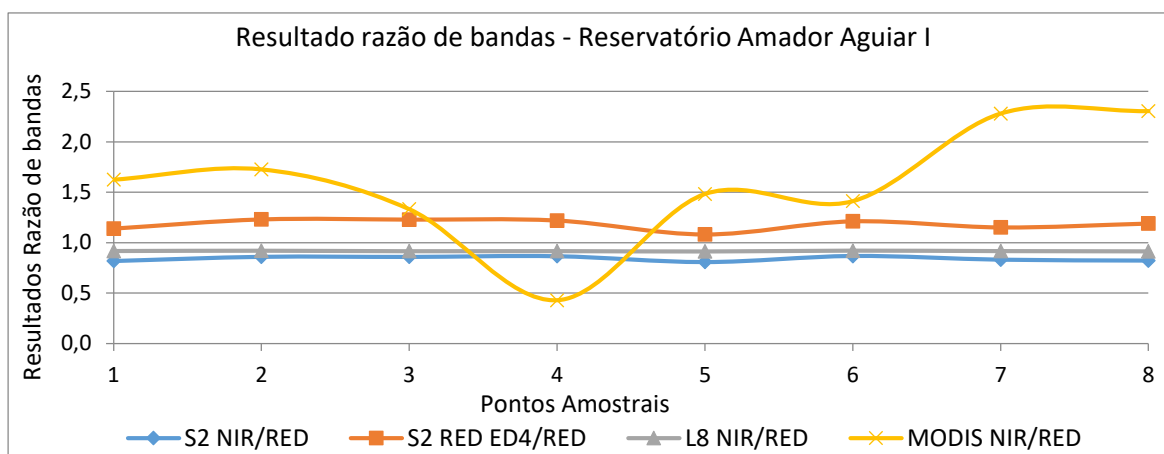


Gráfico 75: Resultado da razão das bandas nos pontos amostrais dos reservatório Amador Aguiar I

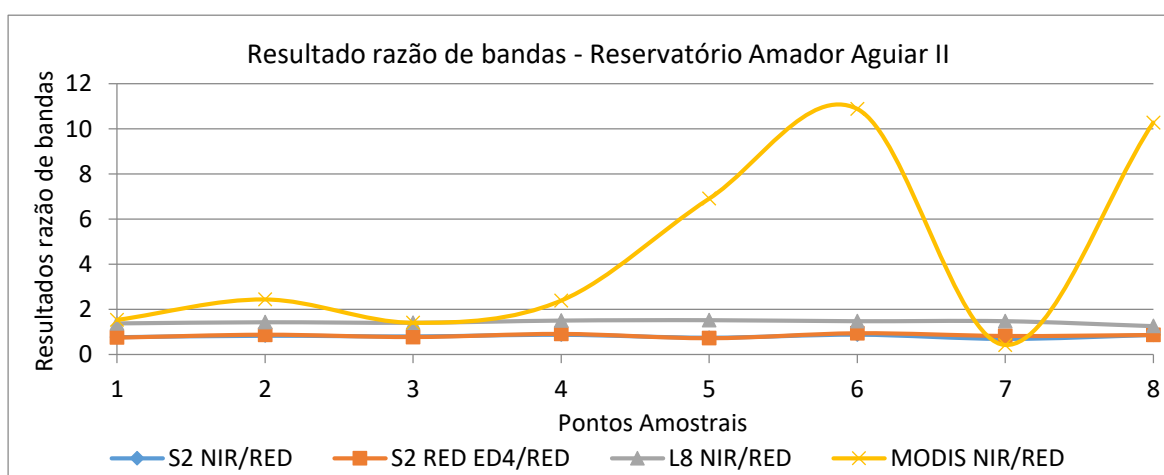


Gráfico 76: Resultado da razão das bandas nos pontos amostrais dos reservatório Amador Aguiar II

A análise de variância foi realizada com o mesmo procedimento das imagens com bandas separadas, segue abaixo os resultados (tabelas 41 a 46), as imagens do satélite Modis não foram aplicadas a anova, por não serem considerados os pixels vizinhos, logo, sem repetições de ponto amostrais, no caso do Modis ao considerar os pixels vizinhos, devido a resolução espacial, poderia acontecer de pegar pixels com resposta do solo e vegetação das bordas dos reservatórios.

Na Análise de variância da razão das bandas NIR/RED do satélite Landsat 8 e do Sentinel no reservatório Amador Aguiar I o valor de P foi igual a zero, portanto $P < \alpha$. O Mesmo resultado de anova ocorreu para a razão entre as bandas RED-ED4/RED nos dois reservatórios, e para as bandas NIR/RED do reservatório Amador Aguiar II.

Portanto, todas as razões entre bandas apresentaram diferenças significativas todas com 10% de significância, tanto entre os pontos amostrais (entre tratamentos) como entre os pixels vizinhos do mesmo ponto (dentro do tratamento), portanto, para identificar quais médias apresentaram maiores diferenças foi aplicado o teste de tukey (tabelas 31 a 48)

Reservatório Amador Aguiar I

Tabela 31: Tukey HSD; variável NIR/RED do satélite Landsat 8 no reservatório Amador Aguiar I

Ponto	Média	Grupo Tukey				
		a	b	c	d	e
P5	0,91301			****		
P8	0,91396	****		****		
P3	0,91510	****	****	****		
P4	0,91589	****	****			
P7	0,91615	****	****			
P1	0,91685		****		****	
P2	0,91920				****	****
P6	0,91980					****

Tabela 32: Tukey HSD; variável NIR/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I

Ponto	Média	Grupo Tukey		
		a	b	c
P5	0,808039	****		
P1	0,818046	****		
P8	0,822514	****		
P7	0,831189	****		****
P3	0,857937		****	****
P2	0,858748		****	****
P4	0,864316		****	
P6	0,866995		****	

Tabela 33: Tukey HSD; variável RED-ED4/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I

Grafico 77: resultado da variância da razão de banda NIR/RED do satélite Landsat-8 no reservatório Amador Aguiar I

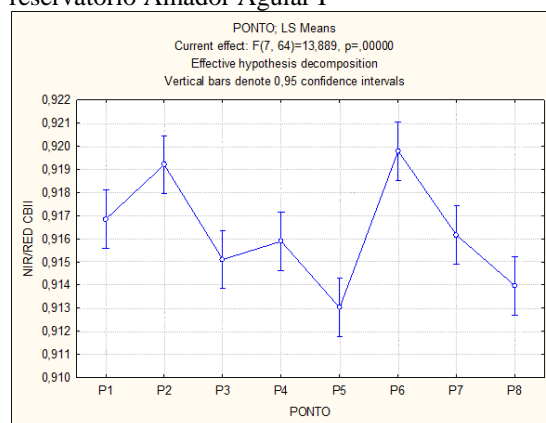


Grafico 78: resultado da variância da razão de banda NIR/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I

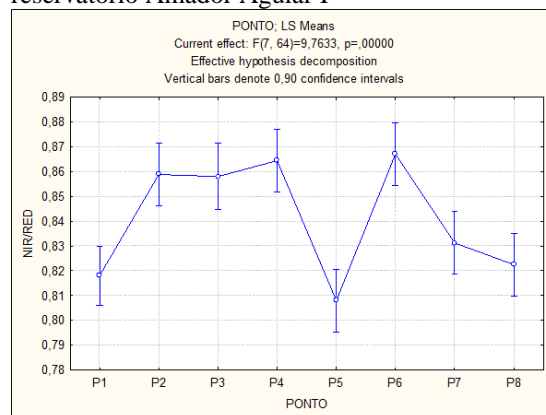
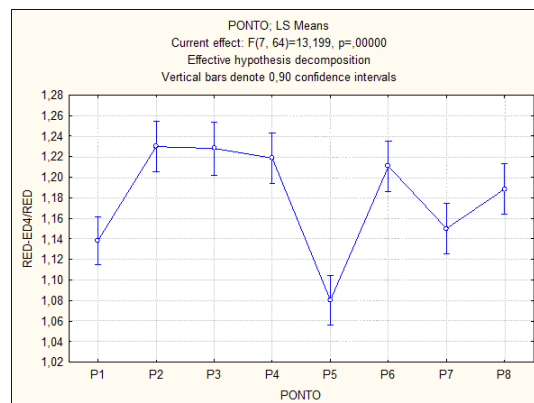


Grafico 79: resultado da variância da razão de banda RED-ED4/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I

Ponto	Média	Grupo Tukey		
		a	b	c
P5	1,080325			****
P1	1,138431		****	
P7	1,150111		****	
P8	1,188591	****	****	
P6	1,210630	****		
P4	1,218669	****		
P3	1,228019	****		
P2	1,229808	****		



Pelo teste de Tukey aplicados para a razão de bandas no reservatório Amador Aguiar I, foi possível identificar que entre a razão entre as bandas vermelho e infravermelho aumentou a diferença entre os pontos amostrais. Nas bandas do satélite Landsat 8 os pontos amostrais foram classificados em cinco grupos diferentes (tabela 47), sendo os pontos 5 e 8 que apresentaram as menores médias, seguidas dos pontos 3, 4 e 7. Os pontos 6 e dois apresentaram as maiores médias e semelhanças entre si, o ponto 2 também apresentou semelhança com o ponto 1.

Já nas imagens do Sentinel 2 para os mesmos pontos para a mesma razão de bandas o ponto 5 também apresentou a menor média, e semelhança com os pontos 1, 8 e 7 (tabela 48), os pontos 7, 3 e 2 apresentaram semelhanças entre si, assim como os pontos 3, 2 4 e 6, sendo esse último o que apresentou a maior média. Foi testada a aplicação da banda Red-ed4 do satélite Sentinel, essa banda é localizada na mesma faixa espectral da banda infravermelho, mas é mais estreita, foi aplicada a matemática de bandas dessa banda com a vermelha e os resultados também foram comparados na análise de variância. Na análise de Tukey o ponto 5 apresentou a menor média sendo diferente de todos os demais pontos, os pontos 1, 7 e 8 abrangeram o segundo grupo de médias, sendo semelhantes entre si, o ponto 8 se assemelhou ao terceiro grupo das menores médias, compostos pelas bandas 6, 4, 3 e 2.

Na análise geral, é possível verificar que os resultados realçados da razão entre bandas seguiram um padrão, onde em todas as três análises o ponto 5 apresentou menor média, os demais pontos, na razão de bandas NIR/RED o ponto 6 apresentou a maior média em entre os pontos apresentaram maiores variações (gráfico 19) quando comparados com as outras análises.

Reservatório Amador Aguiar II

Tabela 34: Tukey HSD; variável NIR/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar II

Ponto	Média	Grupo Tukey			
		a	b	c	e
P8	1,345377			****	
P1	1,401918	****		****	
P3	1,409586	****		****	
P2	1,420722	****			****
P4	1,453619	****	****		****
P6	1,480013		****		****
P5	1,490975		****		
P7	1,519217		****		

Gráfico 80: resultado da variância da razão de banda NIR/RED do satélite Landsat-8 no reservatório Amador Aguiar II

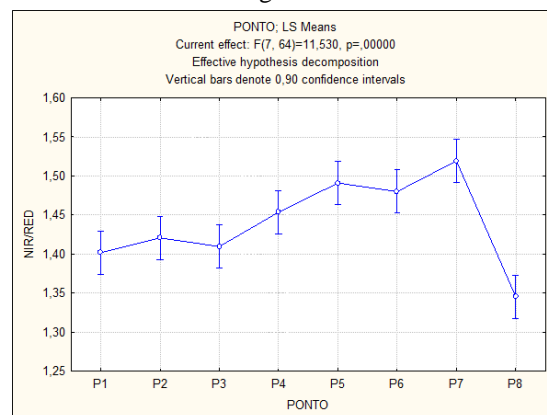


Tabela 35: Tukey HSD; variável NIR/RED do satélite Sentinel2A no reservatório Amador Aguiar II

Ponto	Média	Grupo Tukey		
		a	b	c
P1	0,721458	****		
P7	0,725964	****		
P5	0,761556	****		
P3	0,773573	****		****
P2	0,834850		****	****
P8	0,853348		****	
P6	0,870556		****	
P4	0,901769		****	

Gráfico 81: resultado da variância da razão de banda NIR/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar I

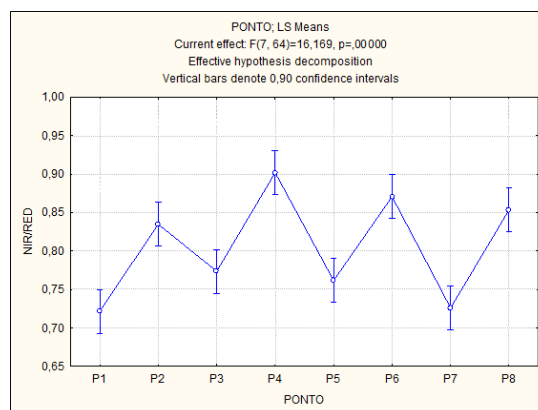
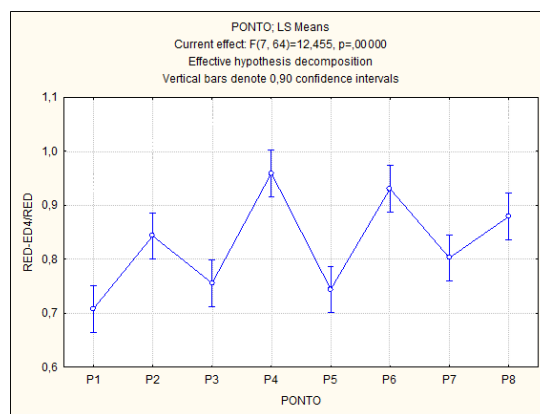


Tabela 36: Tukey HSD; variável RED-ED4/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar II

Ponto	Média	Grupo Tukey				
		a	b	c	d	e
P1	0,708109	****				
P5	0,744187	****	****			
P3	0,755584	****	****			
P7	0,802620	****	****	****		
P2	0,843280		****	****	****	
P8	0,878981			****	****	****
P6	0,930636				****	****
P4	0,959460					****

Gráfico 82: resultado da variância da razão de banda RED-ED4/RED do satélite Sentinel 2A no reservatório Amador Aguiar II



Para obter um modelo que explique a relação entre os valores de sólidos totais e turbidez, consideradas variáveis independentes, com os valores resultantes da razão das bandas, consideradas variáveis dependentes, foi construído o diagrama de dispersão polinomial, no intuito de verificar em qual tipo de curva e a equação do modelo matemático mais se aproxima dos pontos representados no diagrama.

Através do diagrama de dispersão foram analisados os valores de R^2 que apresentam melhores índices, conforme a tabela 37 para os dados do reservatório Amador Aguiar I, e tabela 38 referente ao reservatório Amador Aguiar II.

Tabela 37: valores de R^2 das ordens polinomiais para os parâmetros de sólidos totais e turbidez com os resultados das razões de bandas no reservatório amador Aguiar I

Ordem	Polinomial turbidez Amador Aguiar I			
	Sentinel S2 NIR/RED	Sentinel S2 RED ED4/RED	Landsat L8 NIR/RED	Modis MODIS NIR/RED
2	0,5916	0,1343	0,3211	0,1563
3	0,7729	0,2238	0,5991	0,6409
4	0,855	0,289	0,8507	0,6811
5	0,896	0,7422	0,9505	0,6812
6	0,992	0,7774	0,9629	0,999
Polinomial - sólidos totais				
2	0,177	0,4546	0,0206	0,5459
3	0,2422	0,7793	0,0655	0,59
4	0,5884	0,7921	0,7548	0,6704
5	0,8114	0,7924	0,9121	0,7179
6	0,9704	0,9337	0,9291	0,9855

Tabela 38: valores de R^2 das ordens polinomiais para os parâmetros de sólidos totais e turbidez com os resultados das razões de bandas no reservatório amador Aguiar II

Ordem	Turbidez Amador Aguiar II			
	Sentinel S2 NIR/RED	Sentinel S2 RED ED4/RED	Landsat L8 NIR/RED	Modis MODIS NIR/RED
2	0,2815	0,031	0,8616	0,1837
3	0,5856	0,1585	0,9257	0,8337
4	0,5876	0,1591	0,9855	0,9833
5	0,7786	0,5062	0,988	0,99
6	0,9779	0,8499	0,994	0,9957
Sólidos totais				
2	0,3421	0,0299	0,8014	0,2672
3	0,5912	0,1167	0,915	0,6772
4	0,6132	0,1411	0,918	0,8797
5	0,6152	0,1842	0,9181	0,9698
6	0,5792	0,2464	1,0183	0,9769

O reservatório Amador Aguiar II apresentou índices de correlação polinomial maiores, quando comparados com o Amador Aguiar I. Em ambos os reservatórios os valores da razão das bandas NIR/RED do satélite Landsat 8 apresentou melhores índices de correlação. Nos parâmetros de turbidez e sólidos totais no reservatório Amador Aguiar I as bandas do Sentinel e Landsat (NIR/RED) apresentaram alta correlações a partir da quarta ordem polinomial, embora os índices de correlação da Landsat foram maiores. As imagens do sensor Modis apresentou melhores índices no reservatório Amador Aguiar II.

Nos resultados da razão das bandas NIR/RED, a análise polinomial de quarta ordem, para a turbidez apresentou índices satisfatórios para as imagens do Sentinel ($R^2 = 0,855$), Landsat ($R^2 = 0,8507$) e Modis ($R^2 = 0,6811$) a razão entre as bandas RED ED-4/RED não apresentou índices bons, apenas a partir da quinta ordem com R^2 de 0,7422. As bandas do Landsat e Modis apresentaram correlação alta a partir da terceira ordem.

Para o parâmetro de sólidos totais no reservatório Amador Aguiar I a razão das bandas RED ED4/RED do Sentinel apresentou bons resultados a partir da terceira ordem ($R^2=0,7793$) e também na correlação linear ($R^2= -0,76$), enquanto para as imagens do Modis e Landsat ($R^2 = 0,7548$ e $R^2 = 0,6704$) foram a partir da quarta ordem e a Sentinel a quinta ordem polinomial ($R^2 = 0,8114$) (tabela 38).

No reservatório Amador Aguiar II (tabela 38) a razão das bandas Modis e Landsat apresentaram correlação polinomiais satisfatórias a partir da terceira ($R^2= 0,8337$ para turbidez e $R^2= 0,6772$ para sólidos totais) e segunda ($R^2= 0,8616$ para turbidez e 0,8014 para sólidos totais) ordem respectivamente tanto para turbidez como para sólidos totais. Os resultados das bandas do Sentinel2 utilizando a infravermelha e a RED ED-4 tiveram correlação com a turbidez a partir da quinta ordem, e para sólidos totais não apresentaram índices satisfatórios em todas as ordens (tabela 32).

Observa-se de forma geral, que para o reservatório Amador Aguiar II os índices de correlação foram maiores comparados ao I, que pode ser explicado pelos valores de sólidos totais e turbidez superior encontrado no II. A razão entre as bandas realçou os contrastes para identificação de sólidos totais, onde obtiveram índices melhores quando comparados com as bandas isoladamente.

Contudo, a análise do diagrama de dispersão apresentou índices melhores no reservatório Amador Aguiar II, pode-se considerar dentro do padrão de normalidade devido este reservatório apresentar, mesmo que de forma sutil, maiores quantidades de sólidos totais e turbidez, como a razão das bandas aplicadas neste estudo utilizou as bandas vermelho e infravermelho apropriada para captar sólidos na água.

6. CONCLUSÃO

Foi estudada nesta pesquisa a utilização de sensoriamento remoto, por sensores orbitais para monitoramento da qualidade da água através dos parâmetros de sólidos totais e turbidez. Reduzindo dessa forma os custos de monitoramento, que em território brasileiro, é precário e com grandes lacunas de espaço e tempo, sendo o grande obstáculo, o alto custo para realizar o monitoramento, da qualidade e quantidade de água que passa pelo território nacional, aplicando uma gestão eficiente no uso sustentável desse recurso.

Ao aplicar a médias entre os valores de sólidos totais e turbidez e compará-los por correlação, os resultados não apresentaram índices satisfatórios de correlação, a análise de variância pela anova indicou que a variação dos valores de sólidos totais não teve diferenças entre si em ambos os reservatórios analisados, embora no reservatório Amador Aguiar os pontos amostrais 1 e 4 apresentaram valores de sólidos consideravelmente acima do padrão das médias. Os valores de turbidez apresentou diferenças no ponto 1 do reservatório Amador Aguiar I e nos pontos 6 e 7 do reservatório Amador Aguiar II, após a aplicação da Anova e a utilização das médias calculadas por ela, os valores de correlação apresentou resultados melhores. A análise de variância se mostrou eficaz para aplicação neste caso, principalmente pela quantidade de pontos de coleta considerados baixos para realização de uma linha de tendência, por isso exigiu uma análise estatística mais detalhada. Confirmando que a análise estatística é um dos pontos fundamentais para a análise dos resultados.

Conclui-se, portanto, que a análise dos pontos amostrais nos dois reservatórios, apresentaram baixas quantidades de sólidos totais e turbidez, se tratando de parâmetros físicos, têm boa qualidade de água. Nessas características, as imagens do satélite Sentinel e do Landsat apresentaram maiores respostas de refletância na banda do azul para o reservatório amador Aguiar I. Já e no II que teve parâmetros de sólidos totais e turbidez mais altos, a banda azul do satélite Sentinel 2, apresentou refletância mais baixa e a banda verde um pouco maior, fazendo com que a curva de refletância das duas bandas se aproximassem. Neste mesmo reservatório a banda vermelha teve refletância entre os intervalos de valores da Azul e verde e infravermelho e Red ed4. No amador Aguiar I a banda infravermelho teve os menores valores de refletância seguido da banda vermelha, confirmando os baixos valores de sólidos e turbidez.

De maneira geral, a variação dos valores de refletância para as imagens do satélite Landsat e Sentinel tiveram pouca variação e seguiram a mesma tendência nos oito pontos amostrais em ambos os reservatórios, embora o reservatório amador Aguiar II apresentou índices de

turbidez e sólidos totais mais elevados em comparação com o Amador Aguiar I, as imagens do sensor Modis apresentaram maiores variações de refletância entre os pontos amostrais. Ao fazer a aplicação do sensoriamento remoto na região estudada, verificou-se que os baixos valores de turbidez e de sólidos totais indicam a homogeneidade das águas dos reservatórios, os pontos amostrais do reservatório Amador Aguiar I manteve-se com pouca variação de refletância em todas as bandas do Landsat e do Modis, e o reservatório Amador Aguiar II que teve concentrações de sólidos e turbidez maiores a variação da refletância entre os pontos foram maiores. As bandas das imagens de satélite analisadas seguiram o padrão de resposta de água em baixas quantidades de sólidos, onde as bandas na faixa do azul tem maior resposta, e à medida que analisa as bandas do vermelho e infravermelho a resposta espectral nessas bandas diminui esse fato também se aplica a águas profundas que também é uma característica dos reservatórios estudados.

Outra questão interessante refere-se ao uso das imagens do sensor MSI do satélite Sentinel, elas apresentaram precisão espectrais compatíveis com as imagens do Landsat, mas com a vantagem de terem resolução espacial mais apurada, possibilitando a delimitação de áreas de forma precisa. Mas ao analisar todas as bandas do espectro visível e infravermelho próximo, as imagens Landsat têm maior capacidade de diferenciação de elementos, pois, nos pontos amostrais cada banda ocupou intervalos de resposta distintos, o que não ocorreu com o Sentinel, com dez metros de resolução espacial, as bandas do vermelho e infravermelho ocuparam o mesmo intervalo de refletância, e quando a presença de sólidos totais foi maior, a banda azul se aproximou da verde. Observa-se nesse caso que a resolução espectral e radiométrica influenciam na diferenciação de elementos, pois as imagens do Landsat tem 16 bits e do Sentinel 12bits, portanto o satélite Landsat tem maior capacidade de realce de elementos.

Esse fato demonstra que a resolução espacial não é uma característica determinante na identificação de elementos, a resolução espectral e radiométrica também influenciam nos resultados. Os índices de correlação das imagens Modis foram maiores no reservatório que apresentou índices mais elevados de turbidez e sólidos totais, que das imagens do Sentinel 2 que possuem resolução espacial de 10 metros, essa apresentaram índices menores do que as imagens Landsat que têm resolução espacial de 30 metros. Na razão entre as bandas, onde a diferença das bandas infravermelha e vermelha é realçada, as imagens Landsat obtiveram maiores índices de correlação em ambos os parâmetros analisados e nos dois reservatórios, seguido das bandas do Modis e por último das bandas do Sentinel.

Os índices de correlação decrescem à medida que o comprimento de onda reduz, dado e exposto, a análise de sólidos totais e turbidez tem índices de correlação maiores nas bandas do infravermelho e vermelho respectivamente, confirmando os trabalhos de Espinoza et al. (2012) para as imagens Modis e de Robert et al. (2016) para as imagens Landsat. Neste caso, a aplicação de razão entre as bandas aumenta o contraste realçando diferenças, foi possível observar que a análise de correlação da razão de bandas foram superiores a análise das bandas isoladamente.

Outro ponto interessante de considerar decorre da utilização de imagens de satélite para extrair informações de objetos de forma simples e em grandes áreas, possibilitando realizar de forma semiautomática e que combinados a outras informações é possível traçar cenários para melhor reconhecimento e intervenções precisas, se necessário.

Como os reservatórios estudados são de acumulação, embora sirva para geração de energia elétrica, os níveis de água se mantêm constantes de forma que a variação sazonal não altera seus níveis. Se houvesse variações, o método de classificação supervisionada seria interessante para modelar essa variação ao longo do ano, pois após a classificação é possível calcular a área inundada.

Há de considerar o intervalo de tempo entre as coletas das amostras e as imagens de satélites, como as imagens tem resolução temporal distintas houve uma variação de dias entre as coletas e as imagens analisadas. A necessidade de imagens sem cobertura de nuvens foi outro fator que causou o distanciamento das imagens e amostras, mas embora houve diferenças de datas, os resultados foram compatíveis tanto entre sensores como entre os parâmetros de sólidos totais e turbidez. Esse é um aspecto negativo na utilização do sensoriamento remoto por imagens de satélite, mas possível de ser contornado utilizando imagens próximas e aplicando análises estatísticas.

Portanto, é possível monitorar reservatórios por sensoriamento remoto, aplicando uma metodologia mais acessível, considerando que a tecnologia de monitoramento orbital está em constante crescimento, pois, a cada ano, mais satélites de monitoramento são lançados, e com custos de aquisição reduzidos, quando comparado com o monitoramento in loco. Embora o monitoramento por sensoriamento remoto não aniquila a visita à campo, ele tende a reduzir a quantidade de visitas pois se complementam, além de oferecer a análise da extensão total da área estudada em um único momento.

Mas levando-se em consideração os aspectos estudados percebe-se que o sensoriamento remoto por imagens de satélite é eficaz também na aplicação em águas interiores com boa

qualidade e que teoricamente exige uma resolução espacial melhor. No entanto, foi possível observar que a aplicação das imagens de sensor Modis também apresentaram resultados satisfatórios ainda que com resolução espacial de 250 metros e aplicados uma área de pouca extensão para esse satélite. Demonstrando que somente a resolução espacial não determina a identificação de objetos.

Por fim, considerando que os reservatórios analisados têm baixas concentrações de sólidos e turbidez, e as bandas dos satélites analisados nessa pesquisa, apresentaram baixas variações de reflectância entre os pontos de coleta, conclui que a análise de qualidade de água por sensoriamento remoto é eficaz. E se aplicado de forma constante, pode ser utilizado no monitoramento da qualidade de água, reduzindo as visitas em campo e consequentemente os custos de monitoramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB’SABER, AZIZ. Os Domínios de Natureza no Brasil – Potencialidades paisagísticas. Ateliê Editorial. São Paulo, 4ª ed. 2007. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9133.v16i16p7-10>

ABDELMALIK K.W. Role of statistical remote sensing for Inland water quality parameters prediction. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences xxx. 2016. DOI: /10.1016/j.ejrs.2016.12.002.

ALCÂNTARA, E.; CURTARELLI, M.; KAMPEL, M.; STECH, J.; Spatiotemporal total suspended matter estimation in Itumbiara reservoir with Landsat-8/OLI images. International Journal of Cartography. 2016. <https://doi.org/10.1080/23729333.2016.1179864>

ALCÂNTARA, E. H.; AMORIM, A. J. E.; MOCHEL, F. R. Aplicação do Sensoriamento Remoto e da Geoestatística o Estudo de Variáveis Físicoquímicas e Biológicas da Água do Estuário do Rio Anil, São Luís, Maranhão – Brasil. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE. Goiânia, Brasil, p. 2803-2810 16-21, 2005.

ALEXANDRIDIS, THOMAS K; OVAKOGLU, GEORGE; CRISMAN, THOMAS L.; SKOULIKARIS, CHARALAMPOS; VERGOS, GEORGE S. Use of MODIS satellite images for detailed lake morphometry: Application to basins with large water level fluctuations. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation n.51. p. 37–46, 2016.

ALMEIDA, TATI. D.; MENESES, PAULO ROBERTO. Introdução ao Processamento de imagens de sensoriamento remoto. Universidade de Brasília. Brasília. 2012.

AMORIM, Camila Costa. LEÃO, Monica Maria Diniz. QUEIROZ C. Andrade. QUEIROZ M., Teixeira Andrade. QUEIROZ F. Andrade. SABARA, Millor Godoy. Estudo dos parâmetros físico-químicos, qualidade da água e trofia do reservatório da usina hidrelétrica de Sá Carvalho, Minas Gerais, Brasil. Revista Gestão Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campus Ponta Grossa, Paraná, Brasil, 2016. <https://doi.org/10.3895/gi.v12n1.3103>

ANJOS, A. dos. Capítulo 7: Análise de Variância. Curso Planejamento de Experimentos. Universidade Federal do Paraná, 2005. Disponível em: <<http://www.est.ufpr.br/ce003/material/cap7.pdf>>

BACCARO, C. Unidades Geomorfológicas do Triângulo Mineiro. In: Revista Sociedade & Natureza. Uberlândia, 3 (5 e 6): 37-42, dezembro 1991. <https://doi.org/10.14393/SN-v3-1991-60687>

BAPTISTA, GUSTAVO MACEDO DE MELLO. MACHADO, MARILIA TERESINHA DE SOUSA. Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF). Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.21 n.2. abr/jun 2016. P 357-365. Brasília-DF. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016141970>

BAPTISTA, G. M. DE MELLO. MACHADO, M. T. DE SOUSA. Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF). Engenharia Sanitária e Ambiental 21.2, 2016. Disponível em: www.researchgate.net. Acesso em novembro /2016. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016141970>

BARCELOS, ASSUNÇÃO ANDRADE DE; CABRAL, JOÃO BATISTA PEREIRA; NOGUEIRA, POLLYANNA FARIA; ROCHA, ISABEL RODRIGUES DA. Avaliação Sazonal Das Águas Do Reservatório Da Usina Hidrelétrica Caçu No Município De Caçu, Goiás. Revista do Departamento de Geografia, USP, Volume 29. p. 137 a 160. São Paulo, 2015. <https://doi.org/10.11606/rdg.v29i0.102093>

BARROS, MIRIAN VIZINTIM FERNANDES. CASTRO, PAULO HENRIQUE MARQUES DE. PEREIRA, ADRIANA CASTREGHINI DE FREITAS. Sensoriamento remoto aplicado à avaliação dos impactos a qualidade da água do baixo curso do rio Tibagi – PR.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . _ Brasília: MME : EPE, 2007.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 169p., 2017.

BRASIL. Resolução n 357, de 17 de março de 2005 Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-6.

BRASIL, Agência Nacional das Águas ANA. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/>. Acesso em: janeiro/2018.

BRASIL. Agência Nacional de Águas ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. informe 2010. Brasília, 2010. Disponível em: http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2010_inf.pdf acesso em janeiro/2018.

BRASIL, Agência Nacional de Águas ANA. Panorama das aguas. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/qualidade-da-agua>. Acesso em 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Águas ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Informe 2017. Brasília, 2017. Disponível em: http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/quantidade_qualidade.01fc0121.pdf. Acesso em janeiro/2018.

BRASIL, Resolução nº 189 de 29 de junho de 2017. Conselho Nacional De Recursos Hídricos Resolução Aprova as Prioridades, Ações e Metas do Plano Nacional de Recursos Hídricos para 2016-2020. nº 181, de 7 de dezembro de 2016.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/agua>. Acesso em novembro/2017.

BRASIL. Agencia Nacional de Aguas. Atlas Brasil- Abastecimento de água: panorama nacional. Engecorps/Cobrape; Brasilia. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Recursos Hídricos, 2017. Disponível em: www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2017/01/plano-estabelece-metas-para-frear-crise-hidrica-e-aquecimento-global.

BRASIL. Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997. Institui A Política Nacional de Recursos Hídricos, Cria O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasília, DF, 1997.

BRASIL, Agência Nacional de Águas; Conjuntura dos recursos hídricos: Informe 2016. Agência Nacional de Águas, Brasília, 2016. Disponível em <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh>

BUKATA, R.P. JEROME J.H., KONDRATYEV K.Ya., POZDNYAKOV D.V. Optical Properties and Remote Sensing of inland and Coastal Waters. Boca Raton, CRC Press, 350p.

BUZELLI, G.M. & CUNHA-SANTINO, M.B. (2013) Análise e diagnóstico da qualidade da água e estado trófico do reservatório de Barra Bonita, SP. Revista Ambiente & Água, v. 8, n. 1, p. 186-205. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.930>

CARLSON, R.E. (1977) A trophic state index for lakes. Limnology and Oceanography, v.22, n.2, p.261-269. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>

CARRIJO, B. RODRIGUES. Cartografia geomorfológica com base em níveis de dissecação do relevo no médio curso do rio Araguari-mg. Revista Caminhos de Geografia, 4(10)41-59, 2003. <https://doi.org/10.14393/RCG41015316>

CARVALHO, A. R.; SCHLITTLER, F. H. M.; TORNISIELO, V. L. Relações da atividade agropecuária com parâmetros físicos químicos da água. Química Nova, v. 23, p. 618-622, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000500009>

CASTRO JUNIOR, RODOLFO M.; BORTOLOTTI, FREDERICO D. ; SOBREIRA, FREDERICO G.; Modelagem Geoestatística a Partir De Parâmetros De Qualidade Da Água (Iqa-Nsf) Para A Sub-Bacia Hidrográfica Do Rio Castelo (Es) Usando Sistema De Informações Geográficas. Revista Brasileira de Cartografia N. 59/03, 2007. <https://doi.org/10.14393/rbcv59n3-44892>

CAVENAGHI, ANDERSON LUIS. Caracterização da qualidade de água e sedimento relacionados com a ocorrência de plantas aquáticas em cinco reservatórios da bacia do rio Tietê. 2003. iv, 73 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de

Ciências Agrônômicas, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/105456> acesso em : 2017 <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000400007>

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2008/CETESB. Relatórios-Secretaria de Estado do Meio Ambiente. v. 1, 531p. São Paulo, 2009.

CHAVES, ADRIANA GORETTI DE MIRANDA.; LIMA, JORGE ENOCH FURQUIM WERNECK.; SETTI, ARNALDO AUGUSTO.; PEREIRA, ISABELLA DE CASTRO. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. 2ª ed. – Brasília..p.207, 2000

CHAVEZ, J. P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, New York, v.24, p. 459-479, 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)

COIMBRA, S. DE A.A. O outro lado do meio ambiente. São Paulo, CETESB/ASCETESB, 1985.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Sistema Cemig de monitoramento e Controle de qualidade da água de reservatório – siságua. Manual de procedimentos de coleta e Metodologia de análise de água. Belo Horizonte, 2009.

CONAMA. Resolução nº. 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Publicada no DOU nº 53, de 17 de março de 2005.

CONSORCIO CAPIM BRANCO DE ENERGIA. Plano Diretor -AHE's Capim Branco I e II. Belo Horizonte, 2005. Disponível em <http://www.ccbe.com.br/> Acesso em 2017.

CORAZZA, R. Relações entre variáveis espectrais e limnológicas no reservatório da usina hidrelétrica dona Francisca-RS. Dissertação (mestrado em geografia). Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, 2010.

DÖRHNHÖFER, KATJA; OPPELT, NATASCHA. Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances. Ecological Indicators 64. p.105-122. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.009>

DRUCK, SUZANA. A Geoestatística E Os Sistemas De Informações Geográficas. Embrapa CPAC-Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. Revista Espaço & Geografia, Vol.5, No 1, p. 1-15, 2002.

EL-ZEINY, A.; EL-KAFRAWY, SAMEH. Assessment of water pollution induced by human activities in Burullus Lake using Landsat 8 operational land imager and GIS. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences 20. P. S49–S56. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.10.002>

ESPINOZA VILLAR, RAÚL; MARTINEZ, JEAN-MICHEL; LE TEXIER, MARIE; GUYOT, JEAN-LOUP; FRAIZY, PASCAL; MENESES, PAULO ROBERTO; OLIVEIRA, EURIDES DE. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. Journal of South American Earth Sciences. p 1-10. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.006>

FERREIRA, ALINE BATISTA; PEREIRA FILHO, WATERLOO. Avaliação da refletância espectral de corpos d'água em Santa Maria-RS por meio de espectrorradiometria de campo. Revista Geoambiente On-line. Universidade Federal de Goiás. 2009. Disponível em: www.revistas.ufg.br/geoambiente/article/download/25996/14965. Acesso em Janeiro/2017.

GUO, YULONG; LI, YUAN; ZHANG, YUNLIN; SHI, KUN; ZHU, GUANGWEI; ZHOU, YONGQIANG; ZHANG, YIBO. Monitoring spatiotemporal variations in nutrients in a large drinking water reservoir and their relationships with hydrological and meteorological conditions based on Landsat 8 imagery. Revista Science of the Total Environment 599–600. p.1705, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.075>

HARMANCIOGLU, N. B. OZKUL, O. SINGH, V.P. Entropy-based assessment of water quality monitoring networks. Journal of Hydrologic Engineering. v.5, n.1, 2000. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:1\(90\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:1(90))

HELLER, LEO. PADUA, VALTER LUCIO. Abastecimento de água para consumo humano. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2006.

JAFAR-SIDIK, MADIHAH; GOHIN, FRANCIS; BOWERS, DAVID; HOWARTH, JOHN; HULL, TOM. The relationship between Suspended Particulate Matter and Turbidity

at a mooring station in a coastal environment: consequences for satellite-derived products. Revista Oceanologia 109. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.04.003>

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

LEONCINI, G.O. A natureza das ondas. Química Inorgânica. Universidade Federal de Alagoas, 2009.

LIMA, J. E. F. WERNECK. Recursos hídricos no Brasil e no mundo. Planaltina. Embrapa cerrados. 2001. 46p.

LIRA, C., AMORIM, A., SILVA, A. N. E TABORDA, R. Sistemas de Informação Geográfica: Análise de Dados de Satélite. DGRM, Lisboa, Portugal, 2016. Disponível em www.sophia-mar.pt.

MARQUES FILHO, Ogê; VIEIRA NETO, Hugo. Processamento Digital de Imagens, Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2>. Acesso em novembro/2017

MONTGOMERY, DOUGLAS C. Design and analysis of experiments. Arizona State University. Editora John Wiley & Sons, Inc. 8ª edição, 2013. Arizona, United States.

NASA. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/> Acesso em: 2017.

NASSER, VERA LUCIA. Estudo Da Qualidade De Água Na Baía De Guanabara Utilizando Técnicas De Sensoriamento Remoto e Análise Geoestatística. tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

NAVAL, L. P.; SILVA, C. D. F. Comportamento dos Índices do Estado Trófico de Carlson (IET) e modificado (IETm) no Reservatório da UHE Luís Eduardo Magalhães. In: XXIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, , San Juan.,2004.

NICHOL, JANET E.; NAZEER, MAJID. Improved water quality retrieval by identifying optically unique water classes. *Journal of Hydrology* 541. p. 1119–1132. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.020>

NOVO, E. M. L. M. Monitoramento de Quantidade e Qualidade da Água e Sensoriamento Remoto. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2007.

NOVO, EVLYN MÁRCIA LEÃO DE MORAES. PRADO, RACHEL BARDY. Avaliação espaço-temporal da relação entre o estado trófico do reservatório de barra bonita (SP) e o potencial poluidor de sua bacia hidrográfica. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, 19 (2): p. 5-18, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132007000200001>

OLIVEIRA, CELSO MARAN DE. Política Brasileira De Recursos Hídricos E As Agências De Água. 50 anos passados: aos desafios do futuro. *Governance e Desenvolvimento Sustentável*. Revista Temas de Integração. n. 25, Coimbra, 2008.

PALMER S, Kutser T & Hunter P. Remote sensing of inland waters: challenges, progress and future directions, *Remote Sensing of Environment*, 157, p. 1-8. 2015 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.021>

RICHARDS, JOHN A.; JIA, XIUPING. Remote Sensing Digital Image Analysis An Introduction. Ed. Springer-Verlag. 4th Edition. Berlin Heidelberg, 2006. <https://doi.org/10.1007/3-540-29711-1>

ROBERT A. SCHOWENGERDT. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Third Edition. Ed. Elsevier. San Diego, Califórnia. 2007.

ROBERT, ELODIE; GRIPPA, MANUELA; KERGOAT, LAURENT; PINET, SYLVAIN; GAL, LAETITIA; COCHONNEAU, GÉRARD; MARTINEZ, JEAN-MICHEL. Monitoring water turbidity and surface suspended sediment concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) using MODIS and field reflectance data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52. p. 243–251, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.016>

ROSS, JURANDYR LUCIANO SANCHES; DEL PRETTE, MARCOS ESTEVAN. Recursos Hídricos e as bacias hidrográficas: Âncoras do planejamento e gestão ambiental.

Revista do departamento de geografia. Universidade de São Paulo. São Paulo. n.12, p.89-121, 1998. <https://doi.org/10.7154/RDG.1998.0012.0005>

ROSTOM, NEVEN G.; SHALABY, ADEL A.; ISSA, YOUSRY M.; AFIFI, AHMED A. Evaluation of Mariut Lake water quality using Hyperspectral Remote Sensing and laboratory Works. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences 20. p. S39–S48, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.11.002>

SABESP. Norma Técnica Interna NTS 019. São Paulo, 1999.

SANTOS, Felipe Correa dos. Potencial de utilização do sensoriamento remoto para monitoramento da água do reservatório Passo Real. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS, 2016.

SCHOTT, JOHN R. Remote Sensing the image chain approach. 2nd edition. Oxford university press, 2007.

SCHOWENGERDT, R. A. Spectral Transforms in: Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 3ed. London: Academic Press, 2007. 560p. <https://doi.org/10.1016/B978-012369407-2/50008-5>

SHANMUGAM, PALANISAMY; SIMON, ARTHI. Estimation of the spectral diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance in inland and coastal waters from hyperspectral remote sensing data: Validation with experimental data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 49. p. 117–125, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.02.003>

SILVA, Edson J.; COELHO, Fernando; SILVA, Wesley Pinto da. Sensoriamento remoto no monitoramento da qualidade dos recursos hídricos. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, n. 33, p. 121-130, abr. 2017. <https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v12.n33.437>

TRENTIN, Aline Biasoli. Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo do comportamento espectral da água no reservatório passo real – RS. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS, Brasil – 2009.

UBERLÂNDIA. Departamento Municipal de Água e Esgoto. www.dmae.mg.gov.br. Acesso em maio/2017

VIEIRA JUNIOR, M.; OLIVEIRA, J. F. G.; COELHO, R. T. Dureza de rebois: conceitos estatísticos e dinâmicos e métodos de medição. Máquinas e Metais, São Paulo, v. 30, n. 351, p. 168-85, 1996.

VILELA, Marcos Augusto Macedo Araújo. Metodologia para monitoramento da qualidade de água de reservatórios utilizando sensoriamento remoto. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia MG. 2010.

VON SPERLING, M. Estudo e modelagem da qualidade da água de rios. Belo Horizonte: UFMG, 588 p., 2007.

WOŹNIAK, SŁAWOMIR B. DARECKI, MIROSLAW. ZABŁOCKA, MONIKA. BURSKA, DOROTA. DERA, JERZY. New simple statistical formulas for estimating surface concentrations of suspended particulate matter (SPM) and particulate organic carbon (POC) from remote-sensing reflectance in the southern Baltic Sea. Oceanologia 58. p. 161 - 175. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2016.03.002>

ZHANG, YUNLIN; LI, YUAN; SHI, KUN; ZHU, GUANGWEI; ZHOU, YONGQIANG; ZHANG, YIBO; GUO, YULONG. (2017) Monitoring spatiotemporal variations in nutrients in a large drinking water reservoir and their relationships with hydrological and meteorological conditions based on Landsat 8 imagery. Science of the Total Env. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.075>

