



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
II CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**Uso de Sensoriamento Remoto para monitoramento temporal das concentrações de clorofila-a nos açudes Coremas-Mãe D'Água, Epitácio Pessoa e Engenheiro Ávidos, Paraíba.**

**Letícia Lemos de Moraes**

Orientador: Raúl Espinoza Villar

MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

BRASÍLIA  
2013

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi monitorar a concentração de clorofila-a nos açudes Coremas Mãe D'água, Epitácio Pessoa e Engenheiro Ávidos, no estado da Paraíba, utilizando como fontes de informação imagens do sensor MODIS do período de 2000 a 2013. As séries temporais de clorofila-a estimada a partir da combinação das bandas espectrais do verde (banda 4) e do vermelho (banda 1) desse sensor mostraram flutuações relacionáveis com mudanças hidrológicas sazonais e principalmente com eventos extremos, como as secas e cheias que assolam a região. De modo geral, as concentrações mais elevadas de clorofila-a estimada ocorreram em períodos de seca, principalmente naquelas prolongadas por anos consecutivos. Nos açudes Coremas e Mãe D'água, as concentrações de clorofila-a, que se mantinham em torno de 10 µg/L, iniciaram uma tendência crescente desde a instalação da seca interanual vigente, até se estabilizar em torno de 20 µg/L. No açude Epitácio Pessoa, as concentrações mais elevadas, em torno de 20 µg/L, ocorreram no período de secas severas de 2001 a 2003, quando o açude atingiu volumes mínimos. As concentrações foram então reduzidas para a metade quando o açude recuperou seu volume em janeiro de 2004, chegando a verter, ocasionando a renovação de suas águas. No açude Engenheiro Ávidos, as concentrações de clorofila, entre 5 e 10 µg/L, variaram ao longo dos ciclos anuais inversamente às flutuações do volume armazenado. Todos os açudes apresentaram picos negativos nas séries temporais de clorofila em períodos de eventos extremos de cheias. Esses picos foram claramente relacionados à interferência de sedimentos em suspensão na água. Apesar de ter se mostrado eficiente para analisar qualitativamente os processos de eutrofização em relação às variações hidrológicas, o modelo não se mostrou satisfatório para obtenção de medidas precisas das concentrações de clorofila.



5.7. Indicação de espessura

5.8. Linha de bonso

5.9. Linha de taxi

5.10. Bivota

5.11. Torre de controle

5.12. Área de sacos

5.13.7 Stopway

5.13. Barreira de referência

5.14. Área de retorno

5.15. Instalações

5.15.2. Voo

5.15.3. Voo

3. RADAR IMAGADOR DO R-99

4. RADAR

4.1. Ondas eletromagnéticas

4.2. Comprimento de onda

4.3. Ângulo de incidência

4.4. Polarização

4.5. Radar de Abertura Real – (RAR)

4.6. Radar de Abertura Síntica – (SAR)

4.7. Fatores e fatores que influenciam a resposta

do Radar

4.7.1. Geometria do alvo

4.7.2. Umidade

4.7.3. Freqüência de modulação

4.7.4. Freqüência

4.7.5. Freqüência

**LISTA DE FIGURAS**

*Figura 14. Representação bidimensional das bandas do sensor de pixels misturados entre três pixels (A, B, e C). Os vértices do triângulo são as escuras e o centro do triângulo são os pixels misturados.*

Figura 1- Localização dos açudes estudados no estado da Paraíba..... 2

Figura 2. Variação no espelho d'água dos açudes para anos de cheia e de seca. .... 4

Figura 3. Anomalias da pluviometria nas estações da sub-bacia do rio Piancó. A estação Piancó ..... 5

Figura 4 - Variação do índice de estado trófico segundo diferentes parâmetros no açude Epitácio Pessoa em função do Volume nos anos entre 2002 e 2008. CLO-a- clorofila-a; SECCHI- transparência pelo disco de Secchi; Orto P- Oertofosfato; P total- fósforo total. Fonte: Araújo Júnior (2009). .... 8

Figura 5 - Variação média da Clorofila-a e do volume do reservatório no período de 1989 a 2008, açude Epitácio Pessoa (Boqueirão)-PB. Fonte: Araújo Júnior (2009) ..... 9

Figura 6- Coeficiente de absorção específico para a água pura (aw), os componentes: fitoplâncton (aph), matéria orgânica dissolvida (aCDOM) e o material particulado não orgânico (aTR). (Adaptado de Giardino 2007) ..... 10

Figura 7. a) Comportamento espectral da água pura e da água com algas. b) Reflectância da água com algas com várias concentrações de sedimentos. Fonte: Jensen, 2011. .... 11

Figura 8. Posicionamento das bandas do verde e do vermelho do MODIS sobre as curva de reflectância para água com alta concentração de sedimentos e água com alta concentração de clorofila. a) perfis espectrais medidos no reservatório Armando Ribeiro, no Rio Grande do Norte (Martinez et al., 2011). b) perfis espectrais na várzea do Curuaí (picos mais acentuados) e no rio Amazonas (España et al., 2011). .... 12

Figura 9. Determinação do estado trófico dos lagos estudados por Espanã et al. (2011) mediante simulação de bandas MODIS. .... 12

Figura 10. Espectros obtidos em alguns pontos amostrais. Associados a cada curva, dados de Chla ..... 13

Figura 11. Série de clorofila estimada pelo modelo Modis Mo1 no açude Armando Ribeiro 14

Figura 12. Imagens Modis composição em cor natural (RGB 143). a) sistema Coremas-Mãe D'água. b) açude Epitácio Pessoa c) açude Engenheiro Ávidos. .... 15

Figura 13. Representação da resposta do sensor ao amostrar um pixel misturado. Fonte: Villar, 2013. .... 16

Figura 14. Representação bidimensional (duas bandas) do conjunto de pixels misturados entre três polos (A, B, e C). Os vértices do triângulo são os endmembers de cada alvo e a área interior do triângulo são os pixels misturados. .... 17

Figura 15. Fluxograma de processamento MOD3R. Fonte: Menezes, 2013. .... 17

Figura 16. Máscaras utilizadas para pré-seleção dos pixels a serem analisados ..... 18

Figura 17. Pixels utilizados no processamento da imagem. Em azul são apresentados os pixels que foram selecionados para extração da reflectância. .... 18

Figura 18– Séries da reflectância da água para as bandas do sensor MODIS nos comprimentos de onda do azul (banda 3), do verde (banda 4) e do vermelho (banda 1) e o volume dos açudes. .... 22

Figura 19 – Índices do satélite MODIS definidos por Martinez et al. (2011), Ventura (2013) e España et al. (2011). .... 23

Figura 20 – Série histórica da clorofila estimada pelo modelo Mo1 de Ventura (2013)..... 24

Figura 21 - Vazões diárias para o posto fluviométrico de Piancó no ano de 2004 e a precipitação média na bacia do rio Piancó. .... 25

Figura 22 - Picos de turbidez associados aos picos de reflectância no açude açude Epitácio Pessoa. .... 26

Figura 23– Comparação da série de clorofila estimada pelo modelo Mo1 com dados de clorofila medidos. .... 26

Figura 24 - Comparação da série de clorofila estimada com os dados de clorofila coletados em 4 diferentes pontos do reservatório. BC1=Próximo à barragem (815489E; 9171252N); BC2= Entre Bredos e Campo Redondo (813814E, 9172806N); BC3 = Entre Pedra Branca e Mirador (809102E; 9169696N);BC4= Poço Grande ( 805517E; 9166628N). .... 27

Figura 25 – Imagens obtidas pela diferença entre as reflectâncias no comprimento do verde e do vermelho para imagens do satélite Landsar 8 e Landsat 5, aplicados à área do Açude Epitácio Pessoa. .... 28



5.7 Indicação de espécies ..... 28

5.8 Linha de pouso ..... 29

5.9 Linha de taxi ..... 30

5.10 Bivúta ..... 31

5.11 Torre de controle ..... 32

5.12 Área de escape ..... 33

5.13 Stopway ..... 34

5.14 Área de retorno ..... 35

5.15 Barragem de referência ..... 36

5.16 1 Stopway ..... 37

5.17 Área de escape ..... 38

5.18 Instalações ..... 39

5.19 Área de retorno ..... 40

5.20 Barragem de referência ..... 41

5.21 1 Stopway ..... 42

5.22 Área de escape ..... 43

5.23 Instalações ..... 44

5.24 Área de retorno ..... 45

5.25 Barragem de referência ..... 46

5.26 1 Stopway ..... 47

5.27 Área de escape ..... 48

5.28 Instalações ..... 49

5.29 Área de retorno ..... 50

5.30 Barragem de referência ..... 51

5.31 1 Stopway ..... 52

5.32 Área de escape ..... 53

5.33 Instalações ..... 54

5.34 Área de retorno ..... 55

5.35 Barragem de referência ..... 56

5.36 1 Stopway ..... 57

5.37 Área de escape ..... 58

5.38 Instalações ..... 59

5.39 Área de retorno ..... 60

5.40 Barragem de referência ..... 61

5.41 1 Stopway ..... 62

5.42 Área de escape ..... 63

5.43 Instalações ..... 64

5.44 Área de retorno ..... 65

5.45 Barragem de referência ..... 66

5.46 1 Stopway ..... 67

5.47 Área de escape ..... 68

5.48 Instalações ..... 69

5.49 Área de retorno ..... 70

5.50 Barragem de referência ..... 71

5.51 1 Stopway ..... 72

5.52 Área de escape ..... 73

5.53 Instalações ..... 74

5.54 Área de retorno ..... 75

5.55 Barragem de referência ..... 76

5.56 1 Stopway ..... 77

5.57 Área de escape ..... 78

5.58 Instalações ..... 79

5.59 Área de retorno ..... 80

5.60 Barragem de referência ..... 81

5.61 1 Stopway ..... 82

5.62 Área de escape ..... 83

5.63 Instalações ..... 84

5.64 Área de retorno ..... 85

5.65 Barragem de referência ..... 86

5.66 1 Stopway ..... 87

5.67 Área de escape ..... 88

5.68 Instalações ..... 89

5.69 Área de retorno ..... 90

5.70 Barragem de referência ..... 91

5.71 1 Stopway ..... 92

5.72 Área de escape ..... 93

5.73 Instalações ..... 94

5.74 Área de retorno ..... 95

5.75 Barragem de referência ..... 96

5.76 1 Stopway ..... 97

5.77 Área de escape ..... 98

5.78 Instalações ..... 99

5.79 Área de retorno ..... 100

5.80 Barragem de referência ..... 101

5.81 1 Stopway ..... 102

5.82 Área de escape ..... 103

5.83 Instalações ..... 104

5.84 Área de retorno ..... 105

5.85 Barragem de referência ..... 106

5.86 1 Stopway ..... 107

5.87 Área de escape ..... 108

5.88 Instalações ..... 109

5.89 Área de retorno ..... 110

5.90 Barragem de referência ..... 111

5.91 1 Stopway ..... 112

5.92 Área de escape ..... 113

5.93 Instalações ..... 114

5.94 Área de retorno ..... 115

5.95 Barragem de referência ..... 116

5.96 1 Stopway ..... 117

5.97 Área de escape ..... 118

5.98 Instalações ..... 119

5.99 Área de retorno ..... 120

5.100 Barragem de referência ..... 121

5.101 1 Stopway ..... 122

5.102 Área de escape ..... 123

5.103 Instalações ..... 124

5.104 Área de retorno ..... 125

5.105 Barragem de referência ..... 126

5.106 1 Stopway ..... 127

5.107 Área de escape ..... 128

5.108 Instalações ..... 129

5.109 Área de retorno ..... 130

5.110 Barragem de referência ..... 131

5.111 1 Stopway ..... 132

5.112 Área de escape ..... 133

5.113 Instalações ..... 134

5.114 Área de retorno ..... 135

5.115 Barragem de referência ..... 136

5.116 1 Stopway ..... 137

5.117 Área de escape ..... 138

5.118 Instalações ..... 139

5.119 Área de retorno ..... 140

5.120 Barragem de referência ..... 141

5.121 1 Stopway ..... 142

5.122 Área de escape ..... 143

5.123 Instalações ..... 144

5.124 Área de retorno ..... 145

5.125 Barragem de referência ..... 146

5.126 1 Stopway ..... 147

5.127 Área de escape ..... 148

5.128 Instalações ..... 149

5.129 Área de retorno ..... 150

5.130 Barragem de referência ..... 151

5.131 1 Stopway ..... 152

5.132 Área de escape ..... 153

5.133 Instalações ..... 154

5.134 Área de retorno ..... 155

5.135 Barragem de referência ..... 156

5.136 1 Stopway ..... 157

5.137 Área de escape ..... 158

5.138 Instalações ..... 159

5.139 Área de retorno ..... 160

5.140 Barragem de referência ..... 161

5.141 1 Stopway ..... 162

5.142 Área de escape ..... 163

5.143 Instalações ..... 164

5.144 Área de retorno ..... 165

5.145 Barragem de referência ..... 166

5.146 1 Stopway ..... 167

5.147 Área de escape ..... 168

5.148 Instalações ..... 169

5.149 Área de retorno ..... 170

5.150 Barragem de referência ..... 171

5.151 1 Stopway ..... 172

5.152 Área de escape ..... 173

5.153 Instalações ..... 174

5.154 Área de retorno ..... 175

5.155 Barragem de referência ..... 176

5.156 1 Stopway ..... 177

5.157 Área de escape ..... 178

5.158 Instalações ..... 179

5.159 Área de retorno ..... 180

5.160 Barragem de referência ..... 181

5.161 1 Stopway ..... 182

5.162 Área de escape ..... 183

5.163 Instalações ..... 184

5.164 Área de retorno ..... 185

5.165 Barragem de referência ..... 186

5.166 1 Stopway ..... 187

5.167 Área de escape ..... 188

5.168 Instalações ..... 189

5.169 Área de retorno ..... 190

5.170 Barragem de referência ..... 191

5.171 1 Stopway ..... 192

5.172 Área de escape ..... 193

5.173 Instalações ..... 194

5.174 Área de retorno ..... 195

5.175 Barragem de referência ..... 196

5.176 1 Stopway ..... 197

5.177 Área de escape ..... 198

5.178 Instalações ..... 199

5.179 Área de retorno ..... 200

5.180 Barragem de referência ..... 201

5.181 1 Stopway ..... 202

5.182 Área de escape ..... 203

5.183 Instalações ..... 204

5.184 Área de retorno ..... 205

5.185 Barragem de referência ..... 206

5.186 1 Stopway ..... 207

5.187 Área de escape ..... 208

5.188 Instalações ..... 209

5.189 Área de retorno ..... 210

5.190 Barragem de referência ..... 211

5.191 1 Stopway ..... 212

5.192 Área de escape ..... 213

5.193 Instalações ..... 214

5.194 Área de retorno ..... 215

5.195 Barragem de referência ..... 216

5.196 1 Stopway ..... 217

5.197 Área de escape ..... 218

5.198 Instalações ..... 219

5.199 Área de retorno ..... 220

5.200 Barragem de referência ..... 221

Na região semiárida do Nordeste do Brasil, devido à elevada variabilidade espacial e temporal da pluviosidade, os recursos hídricos disponíveis são limitados e a qualidade da água é comprometida por processos de contaminação natural e antropogênica. Nesse contexto, o monitoramento da qualidade da água torna-se uma atividade essencial para a gestão dos recursos hídricos e a proteção da saúde pública. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para monitoramento de corpos d'água vem a suprir as lacunas espaciais e temporais.

A Agência Nacional de Águas - ANA - e o Institut de Recherche pour le Développement - IRD desenvolveram desde 2009 o Projeto de Cooperação Técnica Monitoramento Espacial Hidrológico de Grandes Bacias (Quantidade e Qualidade) - Projeto "M3G-HIBAM", que teve como objetivo a demonstração da possibilidade de monitorar parâmetros hidrológicos a partir do uso de sensores espaciais. No âmbito do projeto, foram desenvolvidas ferramentas para o processamento de dados em massa, produzindo séries temporais de material em suspensão nas bacias amazônicas e de clorofila-a em açudes do Nordeste. O monitoramento, utilizando imagens do sensor MODIS

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. ÁREA DE ESTUDO .....	2
3. REVISÃO DA LITERATURA .....	6
3.1 A Eutrofização .....	6
3.2 Comportamento espectral da água .....	9
3.3 O sensor MODIS na detecção da clorofila-a .....	11
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	14
4.1 Imagens de satélite .....	14
4.2 Processamento das Imagens .....	16
4.3 Geração das séries de clorofila a partir dos dados MODIS .....	20
4.4 Comparação das séries de clorofila estimada com dados de clorofila .....	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
5.1 Séries temporais de clorofila-a estimada .....	20
5.2 Distribuição espacial do índice associado à clorofila-a .....	27
6. CONCLUSÃO .....	29
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	29

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
SEGURANÇA EM A  
PROT  
TERMO DE RE  
CONHECIMENTO DE

Em  
Declaro estar ciente  
dos termos contidos nos protocolos de  
assunção e compromisso de curso,  
contida no anexo de segurança,  
características pessoais, guardadas em  
deliberação ou licença física, incluindo  
públicas ou privadas e outras fontes  
de informação.

Para também lido o conteúdo  
orientações dos organizadores, bem como  
atividades programadas, durante o curso,  
condutas que possam causar danos à  
imagem do curso e do IGC.

Declaro ainda estar ciente de  
meus atos de matrícula, bem como  
participar do curso, onde não me  
No caso de desistência,  
ser desligado imediatamente do curso,  
consequência desta.

Assinatura do(a) aluno(a)
Assinatura do(a) responsável
Assinatura do(a) orientador(a)

4.1.2.3 Inversão - Flóver	16
4.1.2.3.2 Enturquecimento - Fouling	16
4.1.2.3.1 Comprimimento - Shadowing	16
4.1.2.3.2 Propriedades da imagem radar	16
4.1.4 Umidade	16
4.1.3 Radiação	16
4.1.2 Geometria do alvo	16
4.1.1 Blooming	16
4.1.1.1 Blooming de Radar	16
4.1.1.2 Parâmetros e fatores que influenciam a resposta de Radar	16
4.2 Radar de Abertura Sintética - (SAR)	16
4.2.1 Radar de Abertura Real - (RAR)	16
4.4 Polarização	16
4.3 Ângulo de incidência	16
4.2 Comprimento de onda	16
4.1 Ondas eletromagnéticas	16
4 RADAR	16
3 RADAR IMAGEADOR DO R-99	16
5.12 Computáveis	16
5.12.3 Vantagens	16
5.12.4 Desvantagens	16
5.12.5 Indicações	16
5.14 Áreas de retorno	16
5.13 Bateria de referência	16
5.12.1 Slopway	16
5.12 Áreas de escape	16
5.11 Tira de controle	16
5.10 Bateria	16
5.9 Linha de taxi	16
5.8 Linha de pouso	16
5.7 Indicação de espessura	16



Instituto de Geociências  
Laboratório de Sensoriamento e Análises Espaciais

# 1. INTRODUÇÃO

Na região semiárida do nordeste do Brasil, devido ao elevado déficit hídrico e a alta variabilidade temporal e espacial da pluviometria, os reservatórios de água superficial constituem a principal fonte de fornecimento de água para a população e são também utilizados como pólos de desenvolvimento da economia local e regional devido a novas oportunidades produtivas. Porém, os açudes são altamente vulneráveis às cargas de poluentes lançadas nesses sistemas e apresentam frequentemente perda significativa de qualidade de água.

A questão da eutrofização das águas dos reservatórios superficiais é muito importante e merece uma atenção especial. O uso de fertilizantes nas atividades agrícolas, a drenagem pluvial urbana e o lançamento de esgotos domésticos não tratados ou com tratamento convencional são fatores que contribuem para a elevação das cargas de nutrientes nos açudes. O lançamento de esgotos domésticos adquire maior significância quando se considera o caráter intermitente dos cursos d'água na região do semiárido, cuja capacidade de autodepuração de esgotos é praticamente nula (ANA, 2013).

Vários são os efeitos indesejáveis da eutrofização, entre eles destaca-se o crescimento excessivo de florações de microalgas e cianobactérias, que podem produzir toxinas letais para os animais e os humanos. Em alguns casos, as toxinas podem permanecer na água mesmo após os tratamentos da água bruta, o que pode agravar seus efeitos crônicos. Portanto, a eutrofização é um grave problema ambiental que compromete a qualidade da água dos açudes para o abastecimento público, a dessedentação animal, a recreação de contato primário, a aquicultura e a pesca.

Em ecossistemas de regiões semiáridas, as perturbações hidrológicas de seca e chuvas têm efeitos importantes na variação da concentração de nutrientes e composição de espécies fitoplanctônicas. O monitoramento convencional, de custo alto, geralmente possui frequência de amostragem insuficiente para o entendimento das variações da qualidade da água frente ao ciclo hidrológico anual. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para monitoramento de corpos d'água vem a suprir as lacunas espaciais e temporais.

A Agência Nacional de Águas – ANA - e o Institut de Recherche pour Le Développement – IRD desenvolvem desde 2009 o Projeto de Cooperação Técnica Monitoramento Espacial Hidrológico de Grandes Bacias (Quantidade e Qualidade) - Projeto "MEG-HIBAM", que teve como objetivo a demonstração da possibilidade de monitorar parâmetros hidrológicos a partir do uso de sensores espaciais. No âmbito do projeto, foram desenvolvidas ferramentas para o processamento de dados em massa, produzindo séries temporais de material em suspensão nas bacias amazônicas e de clorofila-a em açudes do Nordeste. O monitoramento, utilizando imagens do sensor MODIS



- 5.7. Indicação de espacialidade
- 5.8. Linha de base
- 5.9. Linha de tálus
- 5.10. Biorota
- 5.11. Torre de controle
- 5.12. Áreas de escabe
- 5.13.1. Stopway
- 5.14. Áreas de retorno
- 5.15. Barragem de referência
- 5.16. Comportamento
- 5.17.5. Várzea
- 5.18.4. mangues
- 5.19. Inundação
- 5.20. Áreas de retorno
- 5.21. Barragem de referência
- 5.22. Comportamento
- 5.23. Várzea
- 5.24. mangues
- 5.25. Inundação
- 5.26. Áreas de retorno
- 5.27. Barragem de referência
- 5.28. Comportamento
- 5.29. Várzea
- 5.30. mangues
- 5.31. Inundação
- 5.32. Áreas de retorno
- 5.33. Barragem de referência
- 5.34. Comportamento
- 5.35. Várzea
- 5.36. mangues
- 5.37. Inundação
- 5.38. Áreas de retorno
- 5.39. Barragem de referência
- 5.40. Comportamento
- 5.41. Várzea
- 5.42. mangues
- 5.43. Inundação
- 5.44. Áreas de retorno
- 5.45. Barragem de referência
- 5.46. Comportamento
- 5.47. Várzea
- 5.48. mangues
- 5.49. Inundação
- 5.50. Áreas de retorno
- 5.51. Barragem de referência
- 5.52. Comportamento
- 5.53. Várzea
- 5.54. mangues
- 5.55. Inundação
- 5.56. Áreas de retorno
- 5.57. Barragem de referência
- 5.58. Comportamento
- 5.59. Várzea
- 5.60. mangues
- 5.61. Inundação
- 5.62. Áreas de retorno
- 5.63. Barragem de referência
- 5.64. Comportamento
- 5.65. Várzea
- 5.66. mangues
- 5.67. Inundação
- 5.68. Áreas de retorno
- 5.69. Barragem de referência
- 5.70. Comportamento
- 5.71. Várzea
- 5.72. mangues
- 5.73. Inundação
- 5.74. Áreas de retorno
- 5.75. Barragem de referência
- 5.76. Comportamento
- 5.77. Várzea
- 5.78. mangues
- 5.79. Inundação
- 5.80. Áreas de retorno
- 5.81. Barragem de referência
- 5.82. Comportamento
- 5.83. Várzea
- 5.84. mangues
- 5.85. Inundação
- 5.86. Áreas de retorno
- 5.87. Barragem de referência
- 5.88. Comportamento
- 5.89. Várzea
- 5.90. mangues
- 5.91. Inundação
- 5.92. Áreas de retorno
- 5.93. Barragem de referência
- 5.94. Comportamento
- 5.95. Várzea
- 5.96. mangues
- 5.97. Inundação
- 5.98. Áreas de retorno
- 5.99. Barragem de referência
- 5.100. Comportamento

(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), já foi testado com sucesso em açudes nos estados do Ceará e Rio Grande do Norte (Martinez *et al.* 2011, Ventura, 2013)

O objetivo deste trabalho é monitorar, a partir de imagens de satélite, as variações temporais e espaciais na concentração de clorofila-a de reservatórios estratégicos do semiárido nordestino, com função de usos múltiplos, principalmente o abastecimento público. Foram selecionados os maiores açudes do estado da Paraíba, o Sistema Coremas-Mãe D'água, o açude Epitácio Pessoa e o açude Engenheiro Ávidos.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A análise por sensoriamento remoto foi realizada nos três maiores reservatórios de abastecimento público do Estado da Paraíba (Tabela 1 e Figura 1): O sistema Coremas-Mãe D'água e o açude Engenheiro Ávidos, na Bacia do rio Piranhas-Açu; o açude Epitácio Pessoa, na Bacia do rio Paraíba. Os açudes foram construídos com recursos federais e por isso são de Domínio da União e, portanto, regulados pela ANA- Agência Nacional de Águas.

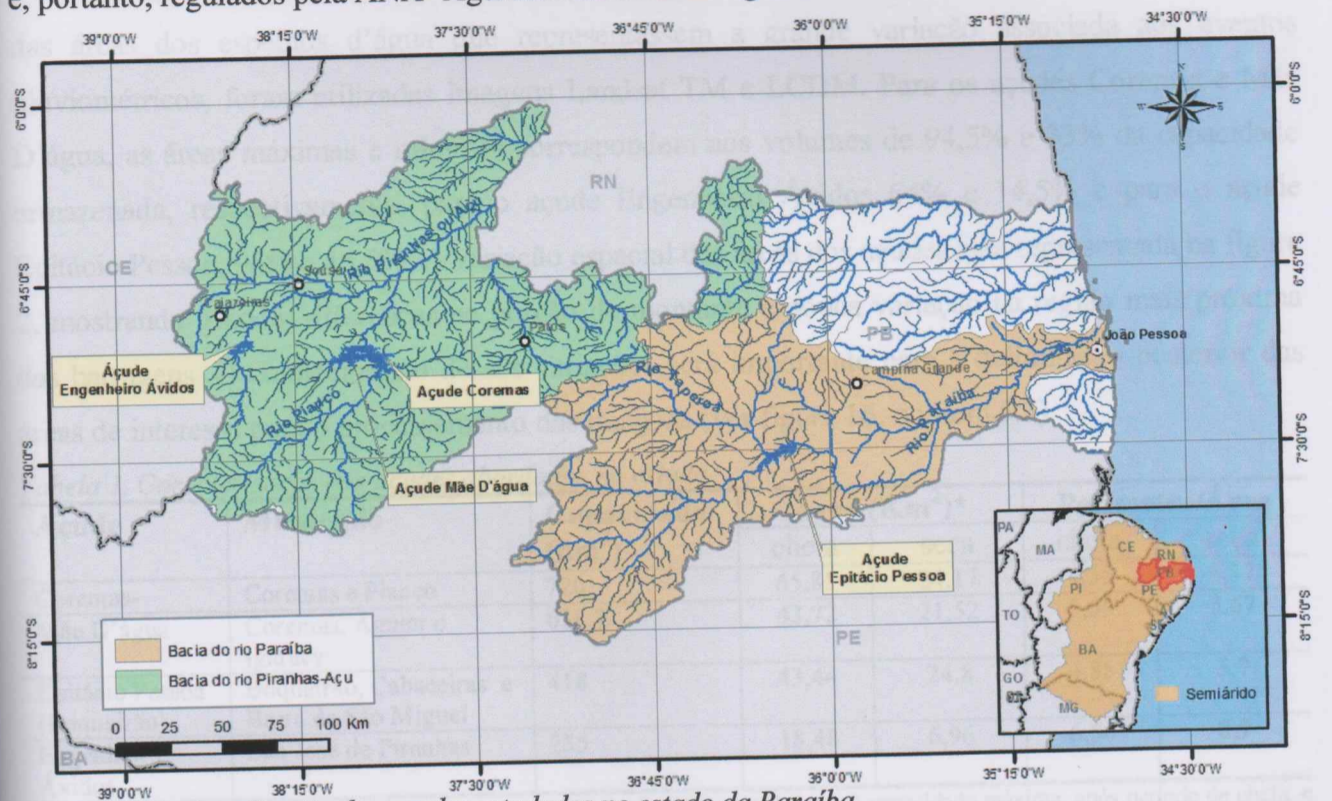


Figura 1 – Localização dos açudes estudados no estado da Paraíba.

O Sistema Coremas-Mãe D'Água, com uma capacidade de mais de 1.300 milhões de m<sup>3</sup>, é o maior açude da Paraíba e o segundo maior da Bacia Piranhas-Açu. É formado pela junção das águas dos açudes Coremas e Mãe D'Água, o primeiro com capacidade de 720 milhões de m<sup>3</sup> e o segundo com 638,7 milhões de m<sup>3</sup>. Esse manancial abastece mais de 20 municípios na Paraíba e Rio Grande

do Norte. Localiza-se na sub-bacia do rio Piancó e sua vazão efluente pereniza cerca de 160 km do rio Piranhas, no trecho até a barragem Armando Ribeiro Gonçalves, localizada no Rio Grande do Norte.

O açude Engenheiro Ávidos, com capacidade de 255 milhões de m<sup>3</sup>, está localizado na sub-bacia Alto Piranhas, sendo utilizado para abastecimento humano, irrigação, piscicultura e regularização do rio Paraíba. Foi construído na década de 30 com a finalidade de abastecimento público da cidade de Cajazeiras e para o controle das cheias no rio Piranhas.

O açude Eptácio Pessoa, mais conhecido como açude Boqueirão, é o principal reservatório da bacia do rio Paraíba, abastecendo 17 municípios e mais de meio milhão de habitantes no estado da Paraíba. É o manancial que abastece o sistema adutor do Cariri e o sistema integrado que abastece a cidade de Campina Grande, a segunda maior cidade paraibana. Seus principais usos são o abastecimento humano, a dessedentação animal e a irrigação, portanto, o desenvolvimento sócio-econômico da região depende do fornecimento da água deste açude. Foi construído entre 1951 e 1957 pelo Governo Federal, através do Departamento Nacional de Obras Contra Secas (DNOCS).

A tabela 1 apresenta algumas características quanto à dimensão dos açudes. Para obtenção das áreas dos espelhos d'água que representassem a grande variação associada aos eventos pluviométricos, foram utilizadas imagens Landsat TM e LCDM. Para os açudes Coremas e Mãe D'água, as áreas máximas e mínimas correspondem aos volumes de 94,5% e 33% da capacidade armazenada, respectivamente, para o açude Engenheiro Ávidos 64% e 14,5% e para o açude Eptácio Pessoa, 96% e 46,5%. A variação espacial das áreas dos açudes está representada na figura 2, mostrando grandes diferenças na porção de montante e pouca variação na região mais próxima das barragens. O conhecimento dessas variações será importante para a delimitação posterior das áreas de interesse para o processamento das imagens (ver figura 16, no item 5.3).

Tabela 1. Características dos açudes abordados no estudo.

Açude	Município	Capacidade (hm <sup>3</sup> )	Área (Km <sup>2</sup> )*		Perímetro/Área	
			cheia	seca	cheia	seca
Coremas-Mãe D'água	Coremas e Piancó	720	65,85	24,17	4,55	5,17
	Coremas, Aguiar e Igaracy	638,7	43,72	21,52	5,65	5,67
Eptácio Pessoa (Boqueirão)	Boqueirão, Cabaceiras e Barra de São Miguel	418	43,44	24,8	4,85	5,7
Engenheiro Ávidos	São José de Piranhas	255	18,48	6,96	6,56	8,9

\* Áreas obtidas a partir de imagens landsat, para os açudes com volumes próximos à capacidade máxima, após período de cheia, e para volumes bastante baixos, em época de estiagem.



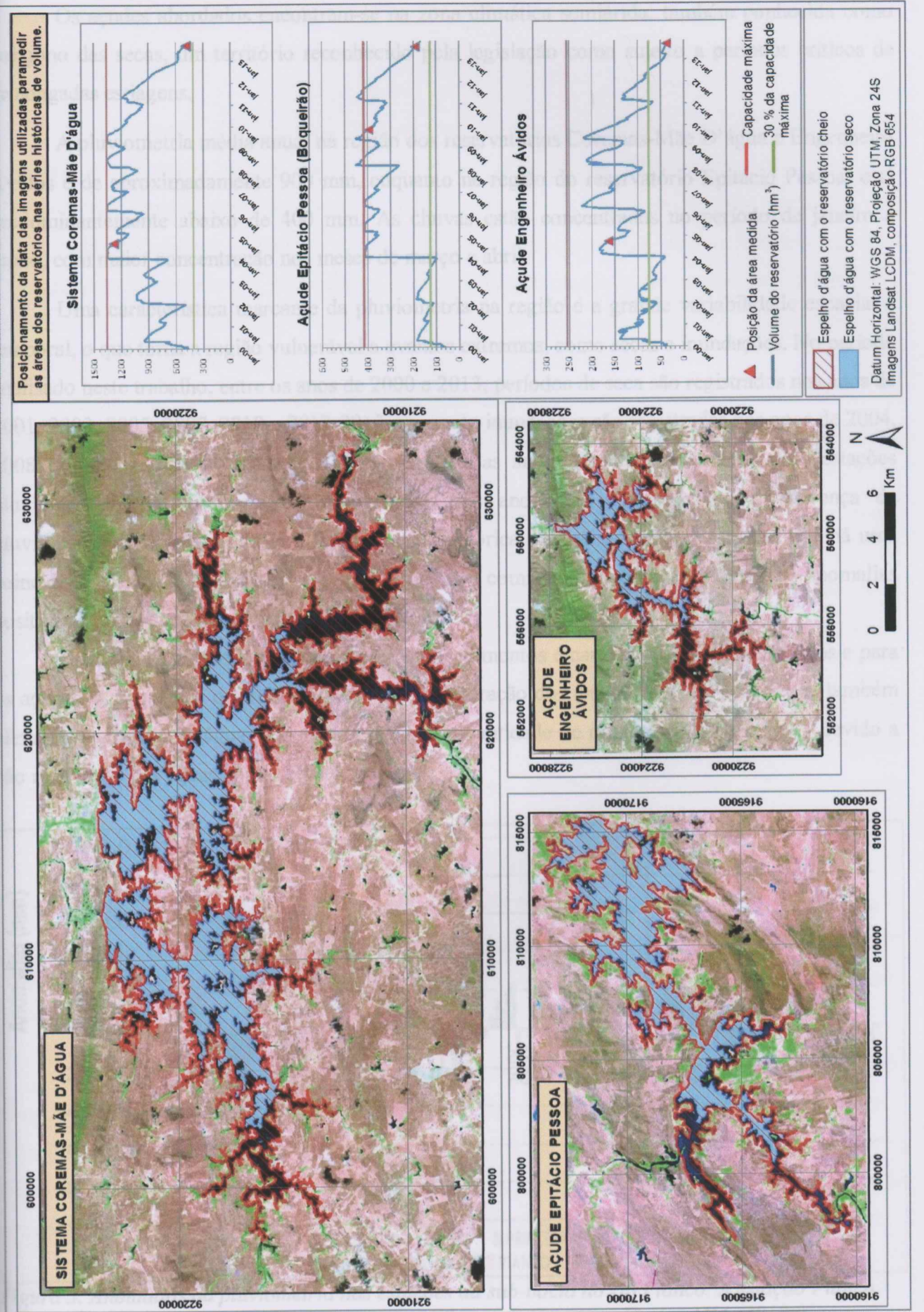


Figura 2. Variação no espelho d'água dos açudes para anos de cheia e de seca.

Os açudes abordados encontram-se na zona climática semiárida, também conhecida como polígono das secas, um território reconhecido pela legislação como sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens.

A pluviometria média anual na região dos reservatórios Coremas-Mãe D'água e Engenheiro Ávidos é de aproximadamente 900 mm, enquanto na região do reservatório Epitácio Pessoa, está predominantemente abaixo de 400 mm. As chuvas estão concentradas no período de janeiro a junho, com maior concentração nos meses de março e abril.

Uma característica marcante da pluviometria na região é a grande variabilidade espacial e temporal, o que torna a região vulnerável a eventos extremos, como secas e inundações. No período analisado neste trabalho, entre os anos de 2000 e 2013, períodos de seca são registrados nos anos de 2001, 2003, 2005, 2007, 2010 e 2012-2013, enquanto inundações são registradas nos anos de 2004, 2008 e 2009. A figura 3 (ANA, 2013a) apresenta as anomalias de pluviometria para estações pluviométricas da sub-bacia do rio Piancó. Tais anomalias correspondem à diferença da pluviometria do ano em relação a médias anual histórica. A análise da figura mostra que há uma coincidência entre as anomalias negativas e os anos com registros de secas e entre as anomalias positivas com os anos com registros de inundações.

Em anos de cheias, grande quantidade de sedimentos é carregada para o leito dos rios e para os açudes. A sequência de anos secos e a não recuperação dos mananciais são fatores que também afetam a qualidade da água, podendo aumentar a quantidade de nutrientes, por exemplo, devido a não renovação das águas nos reservatórios.

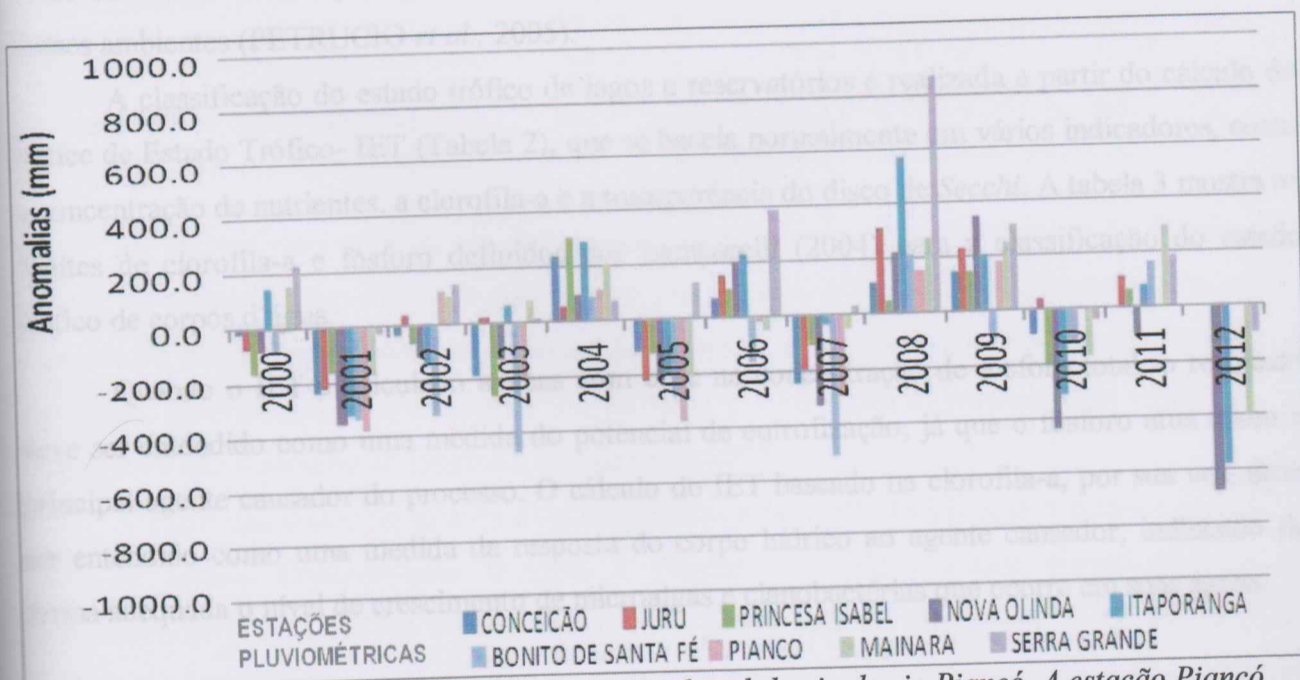


Figura 3. Anomalias da pluviometria nas estações da sub-bacia do rio Piancó. A estação Piancó (-7°12'51''; -37°55'33'') localiza-se a montante do açude Coremas. Fonte: ANA (2013a).

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 A Eutrofização

A eutrofização é o processo de aumento excessivo da concentração de nutrientes nos ecossistemas aquáticos, o que leva à proliferação excessiva de algas, macrófitas aquáticas e cianobactérias, quebrando o equilíbrio natural das cadeias tróficas e acarretando alterações nos ciclos hidrogequímicos (Cunha *et al.*, 2013). O fitoplâncton pode ser conceituado como a “comunidade de organismos procariontes e eucariontes fotoautotróficos portadores de clorofila, suspensos na coluna de água e que não apresentam locomoção suficiente para vencer os movimentos da água” (Fernandes *et al.*, 2005).

Dentre os diversos fatores que influenciam fortemente o risco de ocorrência de multiplicação de algas, estão a profundidade e o tempo de residência da água no reservatório. Quanto mais raso for o reservatório, um maior volume de água em relação ao volume total do reservatório receberá radiação solar, favorecendo o crescimento de organismos fototróficos, como as cianobactérias (Cunha *et al.*, 2013). Da mesma forma, quanto maior o tempo de residência da água no reservatório, maior a quantidade de divisões celulares que podem ocorrer, aumentando a densidade de organismos na água. Outros fatores, como luminosidade e temperatura também podem ter papel controlador na proliferação de cianobactérias.

A caracterização dos níveis de nutrientes, estado trófico, composição e estrutura das comunidades aquáticas constituem ferramentas essenciais para detectar diferentes níveis de impacto sobre os ecossistemas aquáticos, e também para propor medidas de mitigação e de conservação desses ambientes (PETRUCIO *et al.*, 2005).

A classificação do estado trófico de lagos e reservatórios é realizada a partir do cálculo do Índice de Estado Trófico- IET (Tabela 2), que se baseia normalmente em vários indicadores, como a concentração de nutrientes, a clorofila-a e a transparência do disco de *Secchi*. A tabela 3 mostra os limites de clorofila-a e fósforo definidos por Lamparelli (2004) para a classificação do estado trófico de corpos d'água.

Quando o IET é calculado apenas com base na concentração de fósforo total, o resultado deve ser entendido como uma medida do potencial de eutrofização, já que o fósforo atua como o principal agente causador do processo. O cálculo do IET baseado na clorofila-a, por sua vez, deve ser entendido como uma medida da resposta do corpo hídrico ao agente causador, indicando de forma adequada o nível de crescimento de microalgas e cianobactérias que ocorre em suas águas.



5.7	Indicação de espaço	.....
5.8	Linhas de bonso	.....
5.9	Linhas de taxi	.....
5.10	Bicicla	.....
5.11	Torre de controle	.....
5.12	Áreas de sacabe	.....
5.13	Globalway	.....
5.14	Áreas de refração	.....
5.15	Compartivele	.....
5.16	Angulo	.....
5.17	Instalações	.....
5.18	Áreas de retorno	.....
5.19	Barragem de refracção	.....
5.20	Áreas de sacabe	.....
5.21	Globalway	.....
5.22	Áreas de refração	.....
5.23	Compartivele	.....
5.24	Angulo	.....
5.25	Instalações	.....
5.26	Áreas de retorno	.....
5.27	Barragem de refracção	.....
5.28	Áreas de sacabe	.....
5.29	Globalway	.....
5.30	Áreas de refração	.....
5.31	Compartivele	.....
5.32	Angulo	.....
5.33	Instalações	.....
5.34	Áreas de retorno	.....
5.35	Barragem de refracção	.....
5.36	Áreas de sacabe	.....
5.37	Globalway	.....
5.38	Áreas de refração	.....
5.39	Compartivele	.....
5.40	Angulo	.....
5.41	Instalações	.....
5.42	Áreas de retorno	.....
5.43	Barragem de refracção	.....
5.44	Áreas de sacabe	.....
5.45	Globalway	.....
5.46	Áreas de refração	.....
5.47	Compartivele	.....
5.48	Angulo	.....
5.49	Instalações	.....
5.50	Áreas de retorno	.....
5.51	Barragem de refracção	.....
5.52	Áreas de sacabe	.....
5.53	Globalway	.....
5.54	Áreas de refração	.....
5.55	Compartivele	.....
5.56	Angulo	.....
5.57	Instalações	.....
5.58	Áreas de retorno	.....
5.59	Barragem de refracção	.....
5.60	Áreas de sacabe	.....
5.61	Globalway	.....
5.62	Áreas de refração	.....
5.63	Compartivele	.....
5.64	Angulo	.....
5.65	Instalações	.....
5.66	Áreas de retorno	.....
5.67	Barragem de refracção	.....
5.68	Áreas de sacabe	.....
5.69	Globalway	.....
5.70	Áreas de refração	.....
5.71	Compartivele	.....
5.72	Angulo	.....
5.73	Instalações	.....
5.74	Áreas de retorno	.....
5.75	Barragem de refracção	.....
5.76	Áreas de sacabe	.....
5.77	Globalway	.....
5.78	Áreas de refração	.....
5.79	Compartivele	.....
5.80	Angulo	.....
5.81	Instalações	.....
5.82	Áreas de retorno	.....
5.83	Barragem de refracção	.....
5.84	Áreas de sacabe	.....
5.85	Globalway	.....
5.86	Áreas de refração	.....
5.87	Compartivele	.....
5.88	Angulo	.....
5.89	Instalações	.....
5.90	Áreas de retorno	.....
5.91	Barragem de refracção	.....
5.92	Áreas de sacabe	.....
5.93	Globalway	.....
5.94	Áreas de refração	.....
5.95	Compartivele	.....
5.96	Angulo	.....
5.97	Instalações	.....
5.98	Áreas de retorno	.....
5.99	Barragem de refracção	.....
5.100	Áreas de sacabe	.....

Tabela 2. Classes do Índice de Estado Trófico (IET) e seu significado.

Valor do IET	Classes	Significado
$IET \leq 47$	ULTRAOLIGOTRÓFICA	Corpos d'água limpos, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam em prejuízos aos usos da água.
$47 < IET \leq 52$	OLIGOTRÓFICA	Corpos d'água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes.
$52 < IET \leq 59$	MESOTRÓFICA	Corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos.
$59 < IET \leq 63$	EUTRÓFICA	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus múltiplos usos.
$63 < IET \leq 67$	SUPEREUTRÓFICA	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios de florações de algas, e interferências nos seus múltiplos usos.
$IET > 67$	HIPEREUTRÓFICA	Corpos d'água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios de florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

Fonte: CETESB (2008).

Tabela 3. Índice de estado trófico e equivalência com concentrações de fósforo total (P) e clorofila-a (C) e transparência (S) para reservatórios, segundo critério de Lamparelli (2004).

Estado Trófico	IET	Fósforo total ( $\mu\text{g/L}$ )	Clorofila a ( $\mu\text{g/L}$ )	Transparência (m)
Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$	$P \leq 8$	$C \leq 1,17$	$\geq 2,4$
Oligotrófico	$47 < IET \leq 52$	$8 < P \leq 19$	$1,17 < C \leq 3,24$	$2,4 > S \geq 1,7$
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$	$19 < P \leq 52$	$3,24 < C \leq 11,03$	$1,7 > S \geq 1,1$
Eutrófico	$59 < IET \leq 63$	$52 < P \leq 120$	$11,03 < C \leq 30,55$	$1,1 > S \geq 0,8$
Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$	$120 < P \leq 233$	$30,55 < C \leq 69,05$	$0,8 > S \geq 0,6$
Hipereutrófico	$IET > 67$	$P > 233$	$C > 69,05$	$< 0,6$

Em lagos e reservatórios, são comuns períodos de maior desenvolvimento do fitoplâncton quando há alterações significativas dos fatores que regulam o crescimento de células. Na região nordeste há maior dependência das épocas de estiagem e de cheia que regulam os aportes de nutrientes, considerando que a temperatura da água e a intensidade luminosa são relativamente constantes e não limitantes ao longo do ano (Esteves, 1998).

A partir dos dados de fósforo disponibilizados pela SUDEMA/PB para o período de 2007 e 2011, os açudes Coremas-Mãe D'Água e Engenheiro Ávidos foram classificados como supereutróficos (ANA, 2013a). Nesses dois açudes, para o período entre setembro de 2007 e julho de 2008, Macedo (2009) encontrou concentrações de microcistinas superiores a  $1 \mu\text{g/L}$ . Porém as concentrações de clorofila obtidas pelo autor para os principais reservatórios da Paraíba, salvo

exceções que não incluem os reservatórios aqui considerados, foram características de um estado oligotrófico a mesotrófico, com média de 7,5 µg/L no período seco e 2,5 µg/L no período chuvoso.

Araújo Júnior (2009) verificou uma dinâmica de oscilação do estado trófico do açude Epitácio Pessoa de maneira inversa ao volume acumulado no açude na maioria das épocas estudadas (Figura 4). O açude classificou-se como oligo-mesotrófico (1989 – 1991), mesotrófico (2002 – 2003), oligotrófico (2005 – 2007) e oligo-mesotrófico (2008). O mesmo estudo demonstrou que a distribuição das concentrações da clorofila-a ao longo das épocas foi marcada por sazonalidades distintas (Figura 5). No período entre 1989 e 1991, a clorofila-a apresentou os maiores valores médios nas épocas chuvosas, entre 3,3 µg/l e 6,7 µg/l. A partir da chuva 3 (2002), o comportamento dessa variável, foi inverso com aumentos das concentrações nas épocas de seca, principalmente na seca 4, onde ocorreram as maiores concentrações de todo o estudo (média 9,9 µg/L).

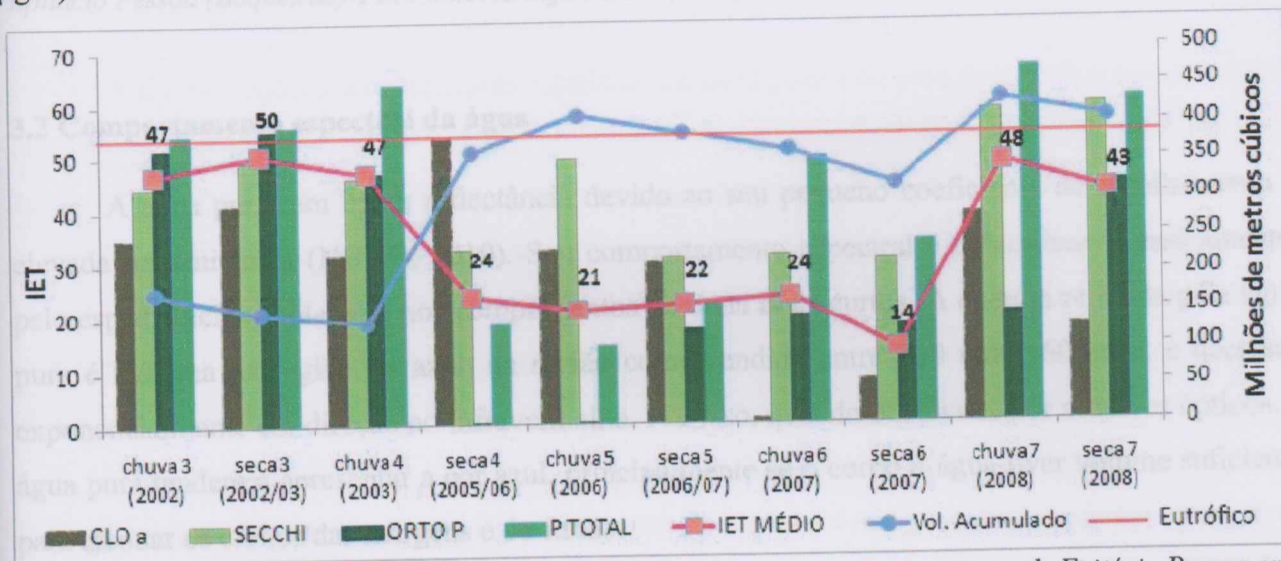


Figura 4 - Variação do índice de estado trófico segundo diferentes parâmetros no açude Epitácio Pessoa em função do Volume nos anos entre 2002 e 2008. CLO-a- clorofila-a; SECCHI- transparência pelo disco de Secchi; Orto P- Oortofosfato; P total- fósforo total. Fonte: Araújo Júnior (2009).

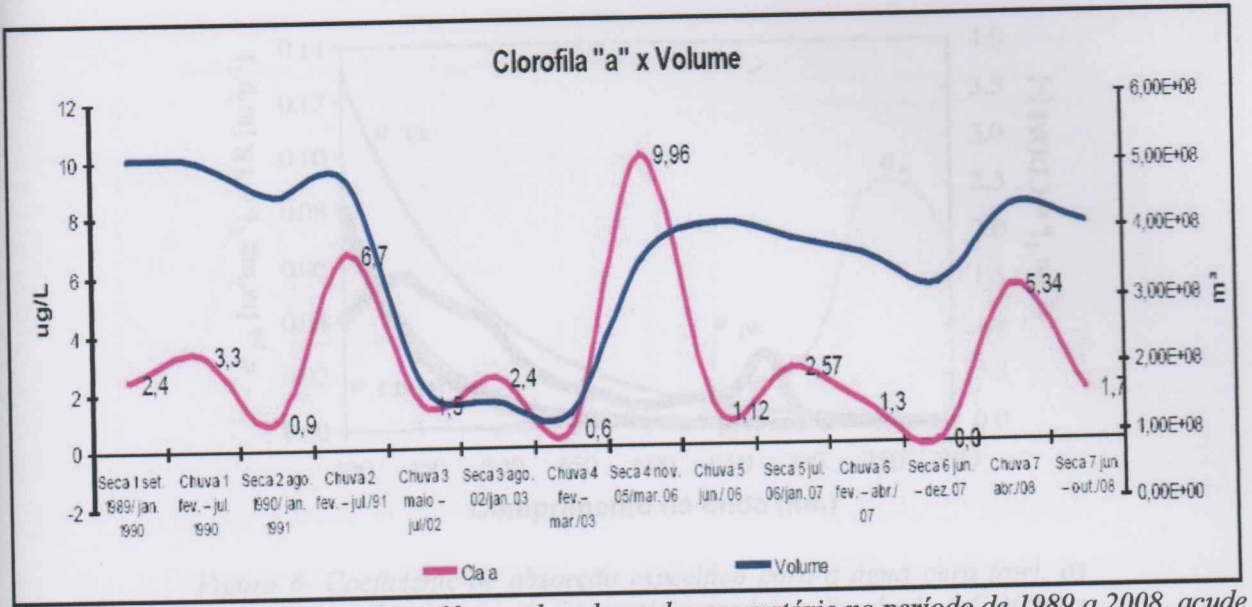


Figura 5 - Variação média da Clorofila-a e do volume do reservatório no período de 1989 a 2008, açude Epitácio Pessoa (Boqueirão)-PB. Fonte: Araújo Júnior (2009)

### 3.2 Comportamento espectral da água

A água pura tem baixa reflectância devido ao seu pequeno coeficiente de espalhamento e elevada transmitância (NOVO, 2010). Seu comportamento espectral é determinado, basicamente, pelo espalhamento molecular nos comprimentos de onda mais curtos. A energia refletida pela água pura é máxima na região do azul, na região compreendida entre 400 nm e 600 nm, e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho. Por isso, quando observada por sensores ópticos, a água pura tenderá a apresentar a cor azul, principalmente se o corpo d'água tiver volume suficiente para atenuar os efeitos das margens e do fundo.

Porém, as águas naturais representam uma mistura complexa de diversos materiais dissolvidos ou particulados, que afetam seu comportamento espectral. Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintéticos e matéria orgânica dissolvida (CDOM) são os componentes opticamente ativos presentes na água. As regiões de absorção e espalhamento destes constituintes da água é que vão definir a forma final da curva de reflectância. Por exemplo, a clorofila-a tem um máximo de absorção no comprimento de onda do azul (440 nm) e do vermelho (676 nm) e uma faixa de absorção mínima no verde (559), o que permite uma comparação entre os espectros e a concentração do fitopigmento. A matéria orgânica dissolvida possui absorção muito alta nos comprimentos de onda curtos e diminui de maneira exponencial para comprimentos de onda maiores. A absorção do material inorgânico particulado é uma curva exponencial negativa, sendo, muito alta no azul e vai baixando quando o comprimento de onda é maior. (figura 6)

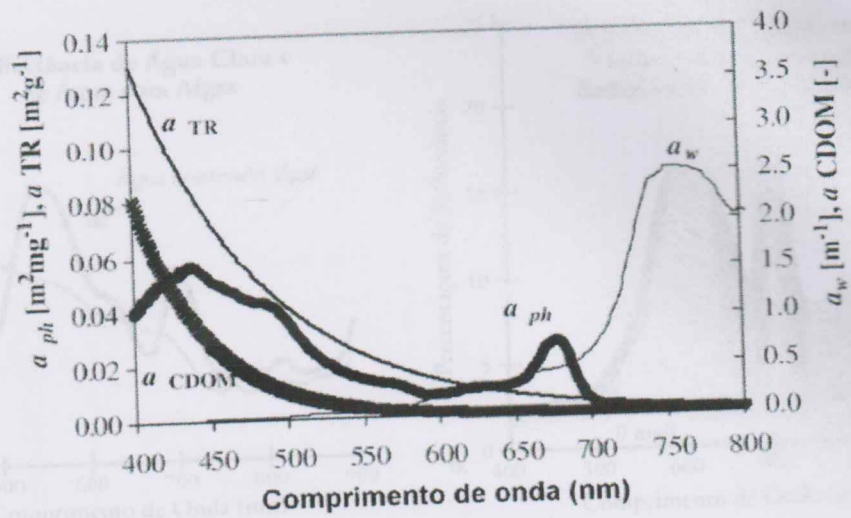


Figura 6- Coeficiente de absorção específico para a água pura ( $a_w$ ), os componentes: fitoplâncton ( $a_{ph}$ ), matéria orgânica dissolvida ( $a_{CD}$ ) e o material particulado não orgânico ( $a_{TR}$ ). (Adaptado de Giardino 2007)

A figura 7 mostra as assinaturas espectrais da água pura e de uma água contendo clorofila-a. Basicamente, quando a concentração de pigmentos aumenta, há diminuição da energia refletida nas bandas de absorção da clorofila-a, ou seja, nos comprimentos de onda do azul e do vermelho. O máximo de reflectância da água passa gradativamente da região do azul para a do verde, ao mesmo tempo em que começa a ocorrer aumento da energia refletida na região em torno de 680-700 nm, que corresponde à região de emissão associada à fluorescência pela clorofila. Com isto, as águas com altas concentrações de pigmentos tenderão a apresentar cor verde (Jensen, 2011).

Quando sedimentos em suspensão e clorofila estão presentes (figura 7b) no corpo d'água ao mesmo tempo, uma resposta espectral diferente é produzida (Jensen, 2011). Com uma maior concentração de sedimentos em suspensão na água há um deslocamento do máximo de reflectância da água em direção a comprimentos de onda mais longos, além disto, observa-se uma ampliação da região espectral em que ocorre esse máximo, que passa a se comportar com um patamar de reflectância quase constante entre 500 e 700 nm. Observa-se também um crescimento expressivo da reflectância na região do infravermelho.



- 5.7 Indicação de capacidade
- 5.8 Linha de pouso
- 5.9 Linha de taxi
- 5.10 Bivúta
- 5.11 Torre de controle
- 5.12 Áreas de escape
- 5.13 Stopway
- 5.14 Área de refração
- 5.15 Garagem de refrigeração
- 5.16 Área de estacionamento
- 5.17 Área de estacionamento
- 5.18 Instalações
- 5.19 Área de estacionamento
- 5.20 Área de estacionamento
- 5.21 Área de estacionamento
- 5.22 Área de estacionamento
- 5.23 Área de estacionamento
- 5.24 Área de estacionamento
- 5.25 Área de estacionamento
- 5.26 Área de estacionamento
- 5.27 Área de estacionamento
- 5.28 Área de estacionamento
- 5.29 Área de estacionamento
- 5.30 Área de estacionamento
- 5.31 Área de estacionamento
- 5.32 Área de estacionamento
- 5.33 Área de estacionamento
- 5.34 Área de estacionamento
- 5.35 Área de estacionamento
- 5.36 Área de estacionamento
- 5.37 Área de estacionamento
- 5.38 Área de estacionamento
- 5.39 Área de estacionamento
- 5.40 Área de estacionamento
- 5.41 Área de estacionamento
- 5.42 Área de estacionamento
- 5.43 Área de estacionamento
- 5.44 Área de estacionamento
- 5.45 Área de estacionamento
- 5.46 Área de estacionamento
- 5.47 Área de estacionamento
- 5.48 Área de estacionamento
- 5.49 Área de estacionamento
- 5.50 Área de estacionamento
- 5.51 Área de estacionamento
- 5.52 Área de estacionamento
- 5.53 Área de estacionamento
- 5.54 Área de estacionamento
- 5.55 Área de estacionamento
- 5.56 Área de estacionamento
- 5.57 Área de estacionamento
- 5.58 Área de estacionamento
- 5.59 Área de estacionamento
- 5.60 Área de estacionamento
- 5.61 Área de estacionamento
- 5.62 Área de estacionamento
- 5.63 Área de estacionamento
- 5.64 Área de estacionamento
- 5.65 Área de estacionamento
- 5.66 Área de estacionamento
- 5.67 Área de estacionamento
- 5.68 Área de estacionamento
- 5.69 Área de estacionamento
- 5.70 Área de estacionamento
- 5.71 Área de estacionamento
- 5.72 Área de estacionamento
- 5.73 Área de estacionamento
- 5.74 Área de estacionamento
- 5.75 Área de estacionamento
- 5.76 Área de estacionamento
- 5.77 Área de estacionamento
- 5.78 Área de estacionamento
- 5.79 Área de estacionamento
- 5.80 Área de estacionamento
- 5.81 Área de estacionamento
- 5.82 Área de estacionamento
- 5.83 Área de estacionamento
- 5.84 Área de estacionamento
- 5.85 Área de estacionamento
- 5.86 Área de estacionamento
- 5.87 Área de estacionamento
- 5.88 Área de estacionamento
- 5.89 Área de estacionamento
- 5.90 Área de estacionamento
- 5.91 Área de estacionamento
- 5.92 Área de estacionamento
- 5.93 Área de estacionamento
- 5.94 Área de estacionamento
- 5.95 Área de estacionamento
- 5.96 Área de estacionamento
- 5.97 Área de estacionamento
- 5.98 Área de estacionamento
- 5.99 Área de estacionamento
- 6.00 Área de estacionamento

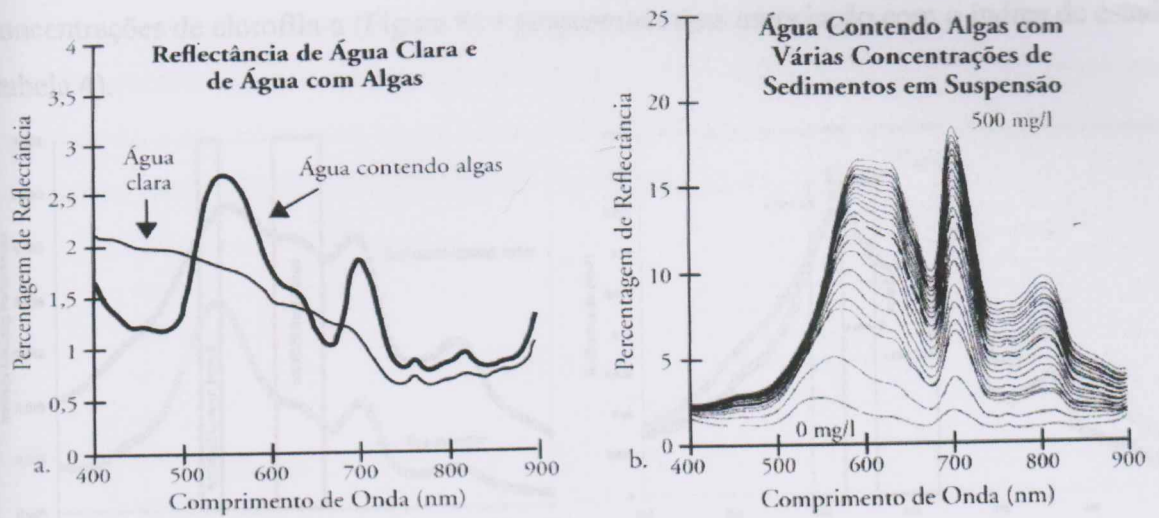


Figura 7. a) Comportamento espectral da água pura e da água com algas. b) Reflectância da água com algas com várias concentrações de sedimentos. Fonte: Jensen, 2011.

### 3.3 O sensor MODIS na detecção da clorofila-a.

Vários modelos desenvolvidos para estimar clorofila-a em águas continentais usando sensoriamento remoto encontram-se em uso (Dall'Olmo *et al.*, 2003; Gitelson *et al.*, 2008), porém a maioria se baseia no sinal típico da clorofila-a próximo a 700 nm, comprimento de onda que não é coberto pelas bandas do sensor MODIS de maior resolução espacial (250 e 500 m).

A utilização de imagens MODIS de 500m de resolução espacial para estimativas da concentração da clorofila-a em açudes do nordeste já foi avaliada por Martinez *et al.* (2011) e Ventura (2013). Com base em medições radiométricas hiperespectrais e calibração com análises da concentração da clorofila-a observada, os autores elegeram as bandas do verde e do vermelho do sensor MODIS como as mais apropriadas para estimativas de concentração de clorofila-a. España *et al.* (2011) utilizou as mesmas bandas do MODIS para obter uma relação proporcional à concentração de pigmentos na água na região amazônica. A Figura 8 mostra o posicionamento das bandas MODIS sobre espectros distintos da água, com alta concentração de sedimentos e com alta concentração de clorofila, nas áreas estudadas por Martinez *et al.* (2011) e España *et al.* (2011).

Martinez *et al.* (2011) criaram um índice de satélite (SI) definido pela diferença entre as reflectâncias no comprimento do verde e do vermelho:  $SI = R_{verde} - R_{vermelho}$ . Onde valores positivos revelam águas verdes associadas à presença de algas, enquanto valores negativos são águas ricas em sedimentos.

España *et al.*, (2011), em vez de utilizar a diferença entre as bandas, utilizou a razão entre elas, onde os valores menores que 1 indicam concentrações baixas de clorofila-a e os valores maiores ou iguais a 1 indicam concentrações altas e portanto, indicaria a presença de florações de algas. Os autores obtiveram uma boa correlação ( $R^2=0,848$ ) entre o índice do satélite e as



concentrações de clorofila-a (Figura 9) e propuseram uma associação com o índice de estado trófico (tabela 4).

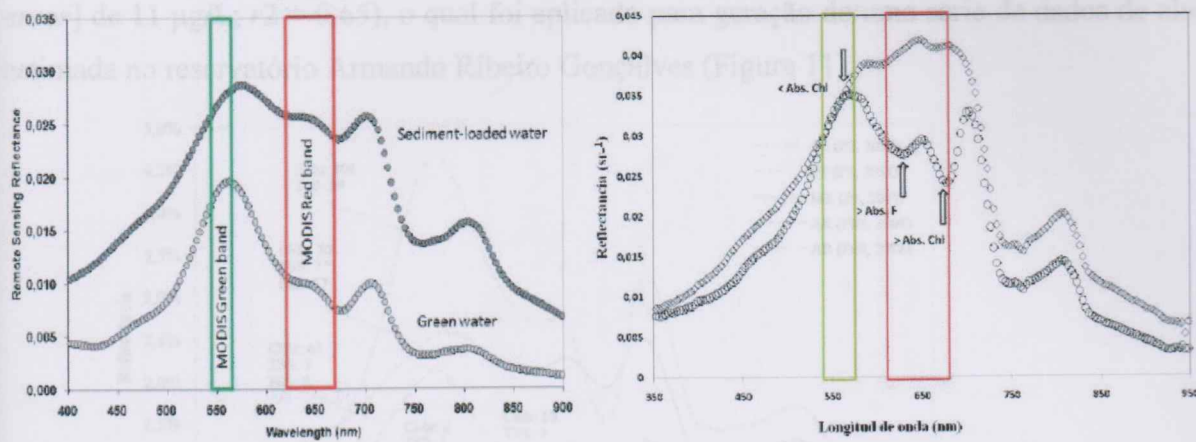


Figura 8. Posicionamento das bandas do verde e do vermelho do MODIS sobre as curva de reflectância para água com alta concentração de sedimentos e água com alta concentração de clorofila. a) perfis espectrais medidos no reservatório Armando Ribeiro, no Rio Grande do Norte (Martinez et al., 2011). b) perfis espectrais na várzea do Curuai (picos mais acentuados) e no rio Amazonas (Espana et al., 2011).

IET Oligotrófico (0,70-0,85) IET Mesotrófico (0,86-0,95) IET Eutrófico (1-1,33)

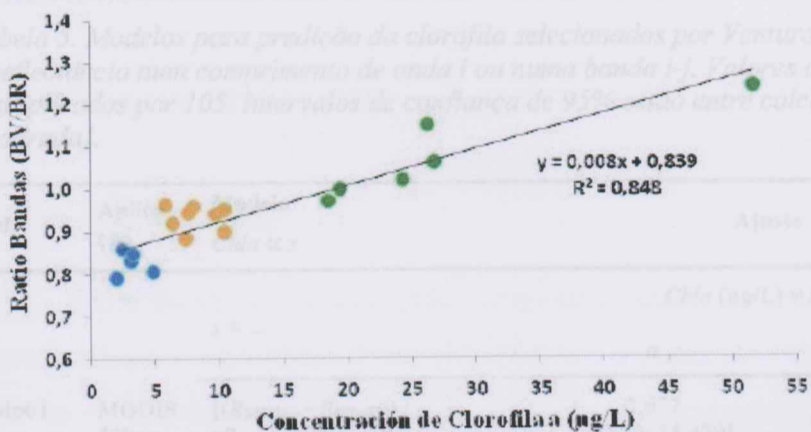


Figura 9. Determinação do estado trófico dos lagos estudados por Espanã et al. (2011) mediante simulação de bandas MODIS.

Tabela 4 - Critérios e valores do Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (1990) e valores estimados por satélite (Espana et al., 2011)

IET	Índice do satélite	Clorofila a (µg/L)
Oligotrófico	0,73- 0,85	<3,81
Mesotrófico	0,86- 0,95	3,82-10,34
Eutrófico	1,0-1,33	10,35-76,06
Hipereutrófico	>1,33	>76,06

Ventura (2013) utilizou dados de clorofila-a e de radiometria de campo (figura 10) para a seleção de vários modelos para predição da clorofila em reservatórios do nordeste. O autor testou 5 modelos aplicáveis a imagens MODIS de 500 m de resolução (tabela 5), utilizando as bandas 1, 3 e

4 deste sensor, que correspondem aos comprimentos de onda do vermelho, do azul e do verde, respectivamente. O único modelo com validação satisfatória foi o Mo01 (RMSE [root-meansquare error] de 11 µg/L;  $r^2 = 0,65$ ), o qual foi aplicado para geração de uma série de dados de clorofila-a estimada no reservatório Armando Ribeiro Gonçalves (Figura 11).

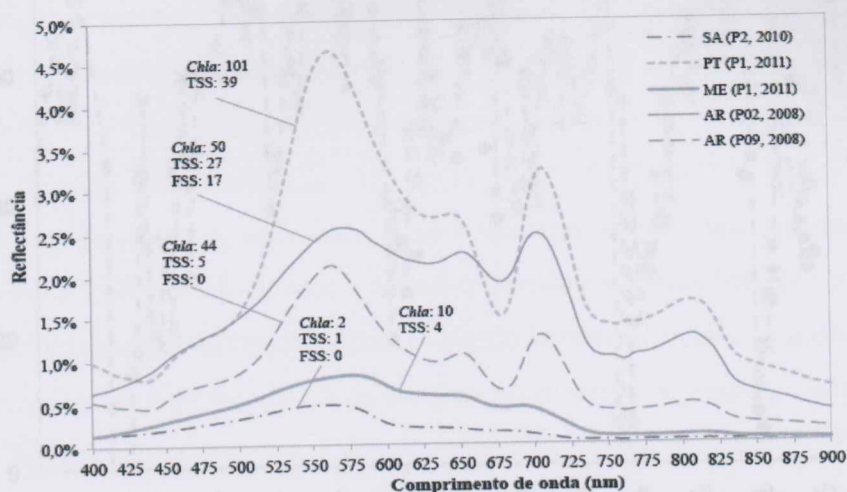


Figura 10. Espectros obtidos em alguns pontos amostrais. Associados a cada curva, dados de Chla (µg/L), TSS (mg/L) e FSS (mg/L).

Tabela 5. Modelos para predição da clorofila selecionados por Ventura (2013). A notação Ri ou Ri-j denota a reflectância num comprimento de onda i ou numa banda i-j. Valores originais de reflectância foram multiplicados por 105. Intervalos de confiança de 95% estão entre colchetes. Abreviações: [sqrt: raiz quadrada].

id.	Aplicação	Modelo $Chla \propto x$	Ajuste	$r^2$	err <sub>632</sub> (µg/L)	Fig.	
<i>Chla (µg/L) = a + bx</i>							
$x = \dots$							
			<i>a</i>	<i>b</i>			
Mo01	MODIS 500 m	$[(R_{545-565} - R_{620-670}) / (R_{545-565} / R_{620-670})]$	2,677 [-4,770; 15,429]	0,109 [0,085; 0,137]	0,74	14,01	8a
Mo02	MODIS 500 m	$\text{sqrt}(R_{545-565} - R_{459-479})$	-23,168 [-31,855; -15,942]	2,221 [1,9916; 2,579]	0,77	12,84	8b
Mo03	MODIS 500 m	$\text{sqrt}(R_{545-565})$	-27,656 [-38,245; -17,864]	1,862 [1,57; 2,159]	0,72	13,99	8c
<i>Modelos complexos</i>							
Mo04	MODIS 500 m	$Chla = ((R_{545-565} + 87,152) / \ln((2R_{620-670} - R_{545-565}))) / 6,907 + ((-79,205 \cdot \exp(R_{545-565}/R_{620-670}) / (112,120 - (R_{545-565}/R_{620-670} + (R_{545-565} - R_{459-479})))) / \ln(((R_{545-565}/R_{459-479}) \cdot \ln(R_{620-670}/R_{459-479})))$			0,94	6,48	8j
Mo05	MODIS 500 m	IF $R_{545-565}/R_{620-670} > 1,8$ THEN $Chla = -38,778 [-57,281; -25,776] + 2,307 [1,848; 2,792] \cdot R_{545-565}$ ELSE $Chla = -22,372 [-46,143; -10,033] + 2,048 [1,604; 2,617] \cdot (R_{545-565} - R_{459-479})$			0,82	12,07	-

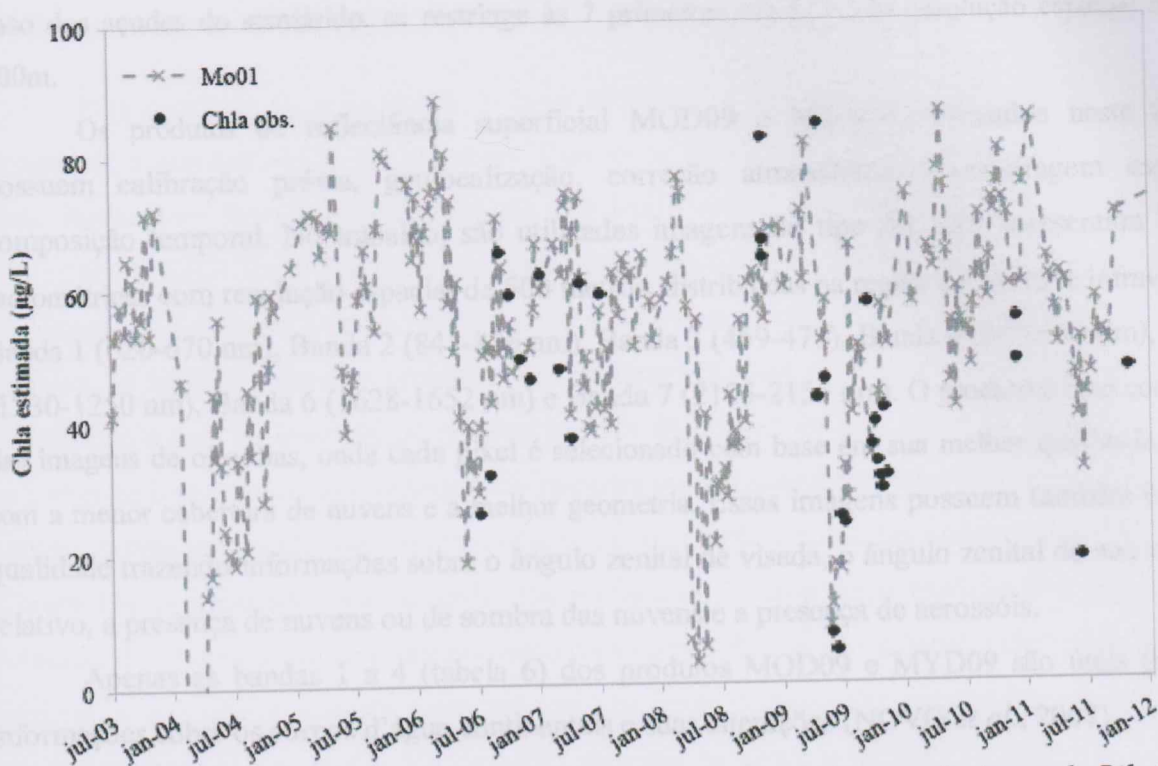


Figura 11. Série de clorofila estimada pelo modelo Modis Mo1 no açude Armando Ribeiro

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

##### 4.1 Imagens de satélite

Neste estudo foram adquiridas imagens do sensor MODIS, produto MOD09 de reflectância superficial, para os satélites Terra (MOD09A1) e Aqua (MYD09A1). O MODIS se destaca para estudos de monitoramento por produzir imagens diariamente e de acesso gratuito. As imagens MODIS possuem uma resolução radiométrica de 12 bits em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4  $\mu\text{m}$  do espectro eletromagnético. Duas bandas são adquiridas na resolução de 250 m, outras cinco bandas na resolução de 500 m e as demais 29 bandas em 1 km (RUDORFF *et al.*, 2007). Os satélites Terra e Aqua possuem horários de passagem diferentes, às 10:30 e 13:30, respectivamente, o que aumenta a chance de aquisição de imagens de melhor qualidade (ângulo de aquisição, cobertura de nuvens). As imagens do satélite Terra (MOD09), o primeiro a ser lançado, estão disponíveis a partir de fevereiro de 2000 e as imagens do satélite Aqua (MYD09), a partir de julho de 2002.

As bandas adequadas à obtenção de informação sobre o fitoplâncton (bandas 8 a 16) têm baixa resolução espacial (1 km), o que as torna praticamente inviáveis para monitoramento de águas continentais. Portanto, a utilização do sensor MODIS para corpos d'água de pequena a média dimensão,



caso dos açudes do semiárido, se restringe às 7 primeiras bandas, com resolução espacial de 250 e 500m.

Os produtos de reflectância superficial MOD09 e MYD09, utilizados neste trabalho, possuem calibração prévia, geolocalização, correção atmosférica, reamostragem espacial e composição temporal. No trabalho, são utilizadas imagens do tipo A1, que apresentam 7 bandas radiométricas com resolução espacial de 500 metros, distribuídas na região do visível e infravermelho: Banda 1 (620-670 nm), Banda 2 (841-876 nm), Banda 3 (459-479), Banda 4 (545-565 nm), Banda 5 (1230-1250 nm), Banda 6 (1628-1652 nm) e Banda 7 (2105-2155 nm). O produto é uma composição das imagens de oito dias, onde cada pixel é selecionado com base em sua melhor qualidade, ou seja, com a menor cobertura de nuvens e a melhor geometria. Essas imagens possuem também bandas de qualidade trazendo informações sobre o ângulo zenital de visada, o ângulo zenital do sol, o azimute relativo, a presença de nuvens ou de sombra das nuvens e a presença de aerossóis.

Apenas as bandas 1 a 4 (tabela 6) dos produtos MOD09 e MYD09 são úteis para obter informações sobre os corpos d'água continentais e suas alterações (NOVO *et al.*, 2007).

Tabela 6- Informações possíveis de serem derivadas do produto MOD09 e MYD09 Fonte: ANDERSON *et al.*, 2003.

Banda	Largura da Banda (nm)	Aplicações
1	620-670	Sensível a variações na concentração de partículas inorgânicas em suspensão
2	841-876	Permite delimitar a superfície de água livre dos lagos e auxilia mapear o limite entre água e vegetação
3	459-479	Sensível à presença de matéria orgânica dissolvida na água
4	545-565	Sensível ao espalhamento pelas células fitoplânctônicas

A série de imagens para os corpos d'água estudados foi obtida a partir do banco de imagens específico GETMODIS (projeto HYBAM). Para cada açude, foram adquiridas cerca de 620 imagens do satélite Terra e 515 do satélite Aqua, para o período de fevereiro de 2000 a setembro de 2013. A figura 12 apresenta a visualização em cor natural para o recorte das imagens para as áreas de estudo.

Figura 12. Representação da respectiva imagem em um pixel misturado. Fonte: Vilor, 2013.

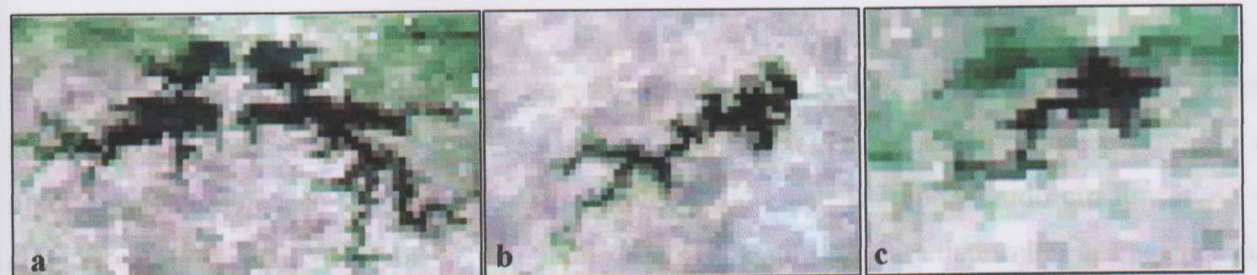


Figura 12. Imagens Modis composição em cor natural (RGB 143). a) sistema Coremas-Mãe D'água. b) açude Epitácio Pessoa c) açude Engenheiro Ávidos.

## 4.2 Processamento das Imagens

Para o cálculo da reflectância da água dos açudes em uma grande quantidade de imagens é necessária a automatização do processo. Para isso, foi utilizado o algoritmo MOD3R “MODIS River Reflectance Retrieval”, desenvolvido pelo IRD (*Institut de recherche pour le développement*).

O MOD3R é um programa de pós-processamento de imagens MODIS desenvolvido em linguagem JAVA para a extração de séries temporais de reflectância de imagens MODIS dos corpos hídricos. O MOD3R permite processar automaticamente um grande número de imagens apenas informando a área de interesse na imagem através da seleção de uma máscara. O programa separa os pixels da imagem que apresentam uma resposta espectral de água, descartando os pixels em que a resposta vem misturada com outros alvos, como vegetação e solos das margens dos corpos d’água (Figura 13). A separação automatizada dos pixels puros é uma etapa fundamental, pois a simples definição de uma máscara de processamento para corpos d’água não garante a identificação de pixel puro, uma vez que a mistura espectral em um pixel pode variar temporalmente nas imagens adquiridas como consequência das variações sazonais no nível de água do reservatório e do ângulo de aquisição das imagens.

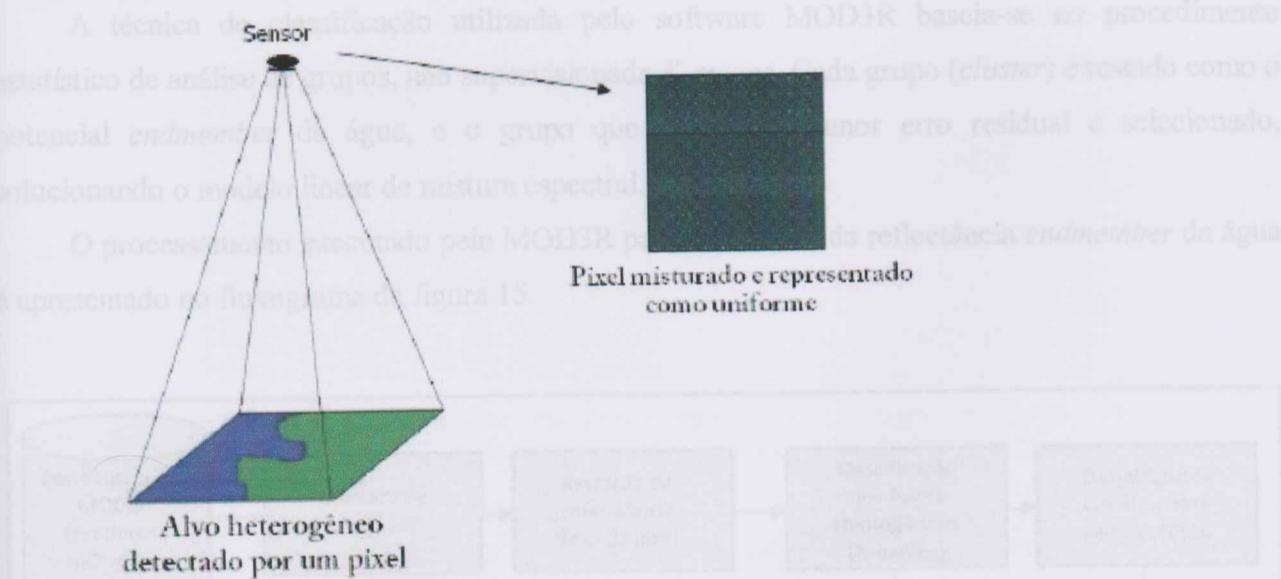


Figura 13. Representação da resposta do sensor ao amostrar um pixel misturado. Fonte: Villar, 2013.

Para determinar as dimensões da mistura espectral recorre-se a uma análise sub-pixel, aplicando-se o modelo linear de mistura espectral. Esse modelo assume que o espectro total de um pixel é uma combinação linear dos espectros “puros” dos materiais, ponderado em função da sua abundância na superfície do pixel. Cada pixel pode ser examinado para determinar a fração de cada *endmember* no pixel, e a qualidade do processo pode ser avaliado usando o erro médio quadrático (RMS). Um *endmember* é um espectro de referência (de pixel puro ou não) que é localizado nos

extremos da área formada na área espectral (Figura 14). Todos os espectros mistos se localizam dentro do espaço formado pelos *endmembers*.

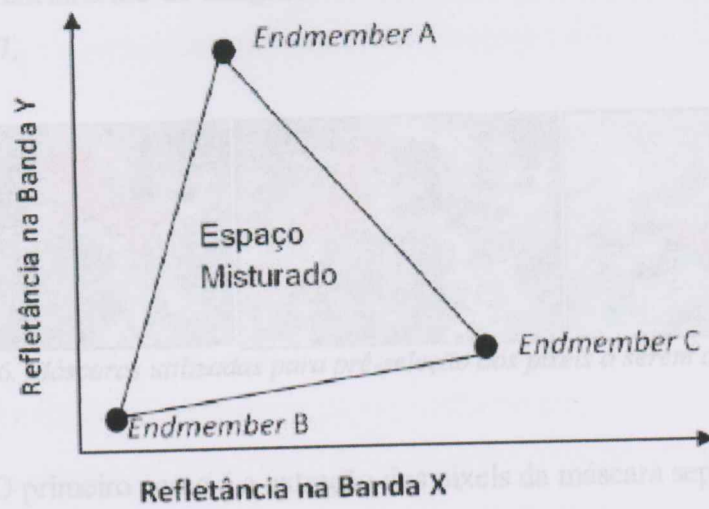


Figura 14. Representação bidimensional (duas bandas) do conjunto de pixels misturados entre três polos (A, B, e C). Os vértices do triângulo são os *endmembers* de cada alvo e a área interior do triângulo são os pixels misturados.

A técnica de classificação utilizada pelo software MOD3R baseia-se no procedimento estatístico de análise de grupos, não supervisionada *K-means*. Cada grupo (*cluster*) é testado como o potencial *endmember* de água, e o grupo que produz o menor erro residual é selecionado, solucionando o modelo linear de mistura espectral.

O processamento executado pelo MOD3R para a extração da reflectância *endmember* da água é apresentado no fluxograma da figura 15.

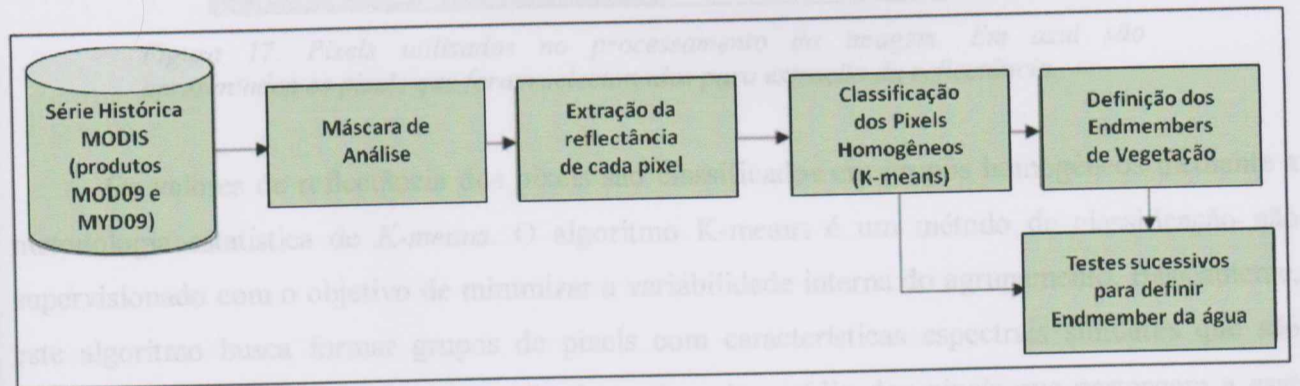


Figura 15. Fluxograma de processamento MOD3R. Fonte: Menezes, 2013.

Os dados de entrada são as imagens que compõem a série histórica a ser analisada e a máscara que define a zona de interesse para processar as imagens (figura 16). As máscaras podem ser delimitadas usando softwares de processamento de imagens ou as ferramentas do *Google Earth*. Só serão processados os pixels que se encontram dentro dos limites determinados pelas máscaras.

Neste trabalho, em função da pequena dimensão dos açudes, optou-se por definir as máscaras sobre as próprias imagens MODIS, de modo a evitar possíveis deslocamentos pelas diferenças no georreferenciamento de imagens diferentes. O software utilizado para a criação das máscaras foi o ENVI 4.7.

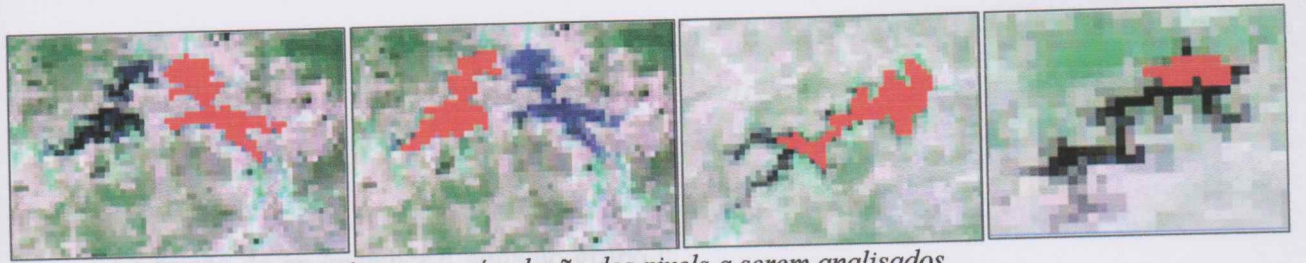


Figura 16. Máscaras utilizadas para pré-seleção dos pixels a serem analisados

O primeiro passo é a extração dos pixels da máscara separando os de melhor qualidade. Para isso são utilizadas as imagens da banda de qualidade do produto de 500 metros. Posteriormente é feita a extração da reflectância dos pixels localizados no interior das máscaras predefinidas. A figura 17 apresenta um exemplo dos pixels que são selecionados automaticamente pelo MOD3R segundo o critério da qualidade.

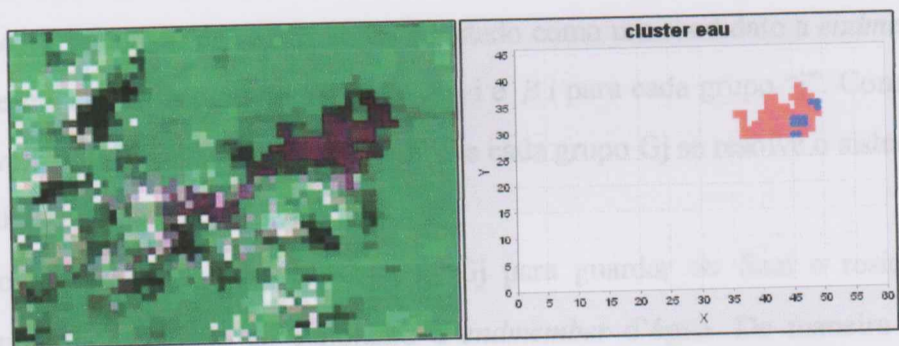


Figura 17. Pixels utilizados no processamento da imagem. Em azul são apresentados os pixels que foram selecionados para extração da reflectância.

Os valores de reflectância dos pixels são classificados em grupos homogêneos mediante a metodologia estatística de *K-means*. O algoritmo *K-means* é um método de classificação não supervisionado com o objetivo de minimizar a variabilidade interna do agrupamento. Basicamente, este algoritmo busca formar grupos de pixels com características espectrais similares que são representados por *K* centróides, identificados pelo valor médio dos pixels que pertencem a esse grupo.

Uma vez definidos os grupos é selecionado aquele que represente melhor o *endmember* de água. Para isso, nas imagens MODIS estima-se o *endmember* da vegetação diretamente por meio da diferença máxima entre os valores de reflectância nos comprimentos de onda do vermelho e do

infravermelho. Por fim, cada grupo é testado como *endmember* da água, e o grupo que produz o menor erro residual é selecionado, solucionando o modelo linear de mistura espectral. Para selecionar o grupo adequado se procede de acordo com a equação 1 para cada banda radiométrica e para cada grupo resultado da segmentação  $i$  com  $1 \leq i \leq K$ .

$$Ref_{j,\lambda} = \alpha_j * Ref_{\lambda, \text{água}} + \beta_j * Ref_{\lambda, \text{vegetação}} + \epsilon_j \quad (1)$$

Onde:

$\alpha_j$ : é a fração do *endmember* d'água no grupo  $j$ ;

$\beta_j$ : é a fração do *endmember* de vegetação no grupo  $j$ ;

$Ref_{\lambda, \text{vegetação}}$ : é a reflectância do *endmember* de vegetação na banda  $\lambda$ ;

$Ref_{\lambda, \text{água}}$ : é a reflectância do *endmember* de água na banda  $\lambda$  a ser testada nos grupos segmentados:  $Ref_{\text{água}} \{ G1, G2, \dots, Gj, \dots, GK \}$ ;

$Ref_{j,\lambda}$ : é reflectância do grupo  $j$  na banda  $\lambda$ ; e

$\epsilon_j$ : é o erro residual resultante da resolução da equação (1) para a banda  $\lambda$  e o grupo  $j$ .

Cada grupo "j" resultado da segmentação é testado como um candidato a *endmember*. Assim, a Equação 1 apresenta duas incógnitas, as frações  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  para cada grupo "j". Com duas equações (para a banda vermelha e banda infravermelha) para cada grupo  $G_j$  se resolve o sistema de equações produzindo estimativas de  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\epsilon_i$ .

Este processo é repetido para cada grupo  $G_j$  para guardar no final o resíduo total  $\epsilon_t = \sum_j \sum_b \epsilon_{j,b}$  que está associado ao candidato a *endmember* d'água. De maneira iterativa vai-se testando cada grupo e o que produzir o menor valor de  $\epsilon_t$  será selecionado como o *endmember* d'água.

O resultado do processamento pelo MOD3R é uma planilha Excel para cada satélite (Terra e Aqua), onde são registrados para cada imagem da série histórica os valores de reflectância das bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho do sensor MODIS. Os dados de reflectância de ambos os satélites (Terra e Aqua) são posteriormente compilados, selecionando aqueles que correspondem à imagem de melhor qualidade para cada data, a fim se obter uma série temporal completa. Além dos valores de reflectância, a planilha apresenta uma classificação da qualidade dos dados. A classificação 0 significa ausência de dados; 1 significa dados de qualidade ótima; 2 são dados de qualidade média e correspondem a dados que foram adquiridos em condições adversas (ângulo de incidência acima de 45 graus ou forte cobertura de nuvens) e 3 são dados de qualidade



ruim, normalmente associada à reflexão da luz do sol pelo espelho de água causando o processo de “Sun glint”.

#### 4.3 Geração das séries de clorofila a partir dos dados MODIS

Sobre a série de dados de reflectância gerados pelo algoritmo MOD3R se aplicaram os índices correlacionados à concentração da clorofila *a* definidos por Martinez *et al.* (2011), Ventura (2013) e España *et al.* (2011), que utilizam relações entre as bandas do verde e do vermelho do sensor MODIS. As estimativas da concentração da clorofila foram feitas aplicando-se a equação obtida e validada por Ventura (2013) para o modelo Mo1 (tabela 5).

As séries de clorofila estimada obtidas foram então comparadas com dados de volume d’água dos reservatórios de modo a analisar a resposta do índice em relação às variações sazonais e interanuais no armazenamento dos açudes.

#### 4.4 Comparação das séries de clorofila estimada com dados de clorofila

A série de clorofila estimada do açude Epitácio Pessoa foi comparada com resultados de análises de clorofila-a disponíveis em relatório da ANA- Agência Nacional de Águas (ANA/ITEP, 2009) e com os dados apresentados por Araújo Júnior (2009). Os dados da ANA são referentes aos períodos de seca e chuva do ano de 2009 para 4 pontos de coleta distribuídos na área do reservatório. Os dados apresentados por Araújo Júnior (2009) representam a média de clorofila para 4 períodos de seca e 5 períodos de chuva, distribuídas nos anos de 2002, 2003, 2006, 2007 e 2008.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1 Séries temporais de clorofila-a estimada

Neste capítulo, são apresentadas as séries temporais da clorofila-a estimada para os reservatórios abordados, comparadas com os registros dos volumes dos reservatórios.

O número de imagens com qualidade aceitável para geração das séries variou para cada reservatório (Tabela 7). Nos menores açudes, o Epitácio Pessoa e o Engenheiro Ávidos, o aproveitamento foi de, respectivamente, 32% e 35% da série de datas abrangidas pelas imagens. No açude Coremas o aproveitamento foi de 67% e no açude Mãe D’água de 95%.



Tabela 7- Número de imagens aproveitadas por reservatório.

	Açude			
	Coremas	Mãe D'água	Epitácio Pessoa	Engenheiro Avidos
Número de imagens de Entrada	620 imagens MOD09 e 514 imagens MYD09			
Número de imagens com geração de dados de reflectância após processamento no MOD3R.	583 MOD09 482 MYD09	558 MOD09 468 MYD09	292 MOD09 259 MYD09	477 MOD09 346 MYD09
Número de imagens na série temporal, após combinação das imagens MOD09 e MYD09.	605	598	381	513
Número de imagens utilizadas para geração da série de clorofila, após exclusão das imagens de pior qualidade.	416	590	200	217

A análise dos dados envolveu, inicialmente, a construção de gráficos de reflectância da água para cada comprimento de onda (Figura 18), de modo a identificar flutuações frente às variações de nível dos açudes. A visualização desses gráficos já permite observar, com exceção do açude Epitácio Pessoa, um ciclo sazonal bem definido das reflectâncias acompanhando de forma inversa pelas variações sazonais do volume armazenado. Uma feição que chama a atenção é a presença de picos de reflectância em todos os açudes em janeiro de 2004, quando houve uma variação brusca no volume de todos eles. Fica também evidente uma tendência crescente das reflectâncias obtidas para os açudes Coremas e Mãe D'água a partir do período de seca do ano de 2009 e uma mudança no patamar das reflectâncias no açude Epitácio Pessoa a partir de janeiro de 2004.

Para relacionar as variações de reflectância com concentrações de clorofila-a, foram aplicados os índices definidos por Martinez *et al.* (2011), Ventura (2013) e Espanã *et al.* (2011), que utilizam relações entre as reflectâncias das bandas do verde e do vermelho das imagens MODIS.

O índice de Espanã *et al.* (2011), definido pela razão entre as reflectâncias do verde e do vermelho, não foi considerado apropriado para aplicação nos açudes. A série temporal desse índice não apresentou coerência com as séries dos demais índices, gerou picos sem associação com dados climáticos e as séries de clorofila geradas apresentaram valores extremamente altos, inconsistentes com dados de qualidade da água disponíveis na literatura.

Os índices de Martinez *et al.* (2011) e de Ventura (2013) apresentam séries muito semelhantes, pois ambos utilizam a diferença entre as bandas do verde e do vermelho, sendo que o segundo a divide pela razão entre elas. Há que se notar que o modelo de Ventura (2013) ou Mo1 corresponde, na verdade, à divisão do índice de Martinez pelo índice de Espanã, o que suaviza as curvas da série. A figura 19 apresenta um exemplo das séries geradas pelos três índices.

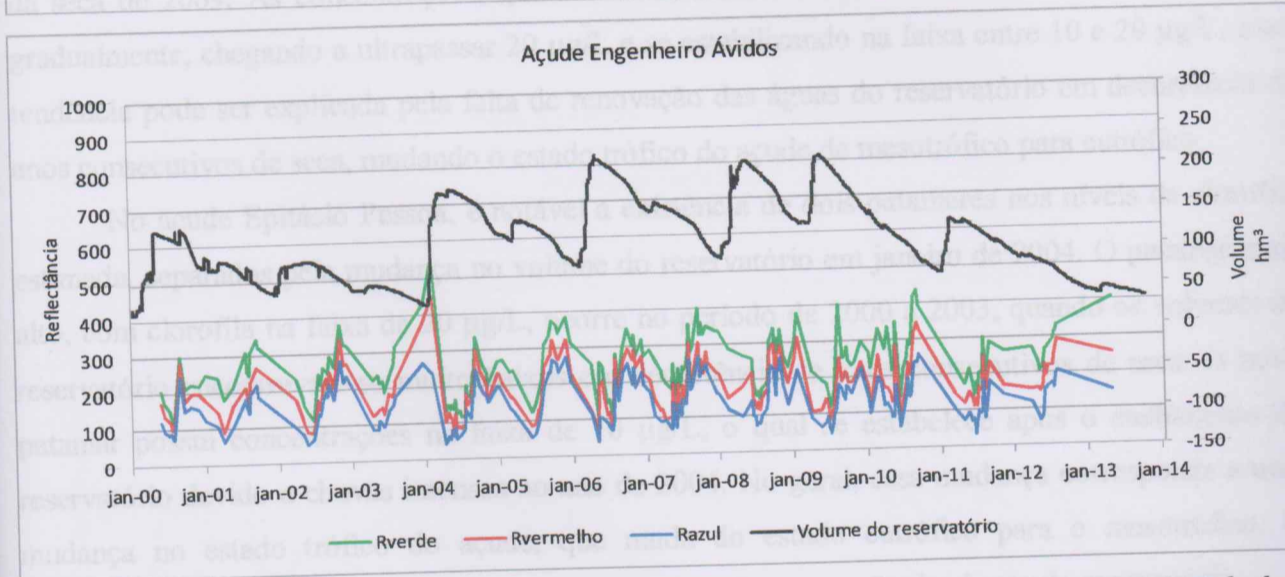
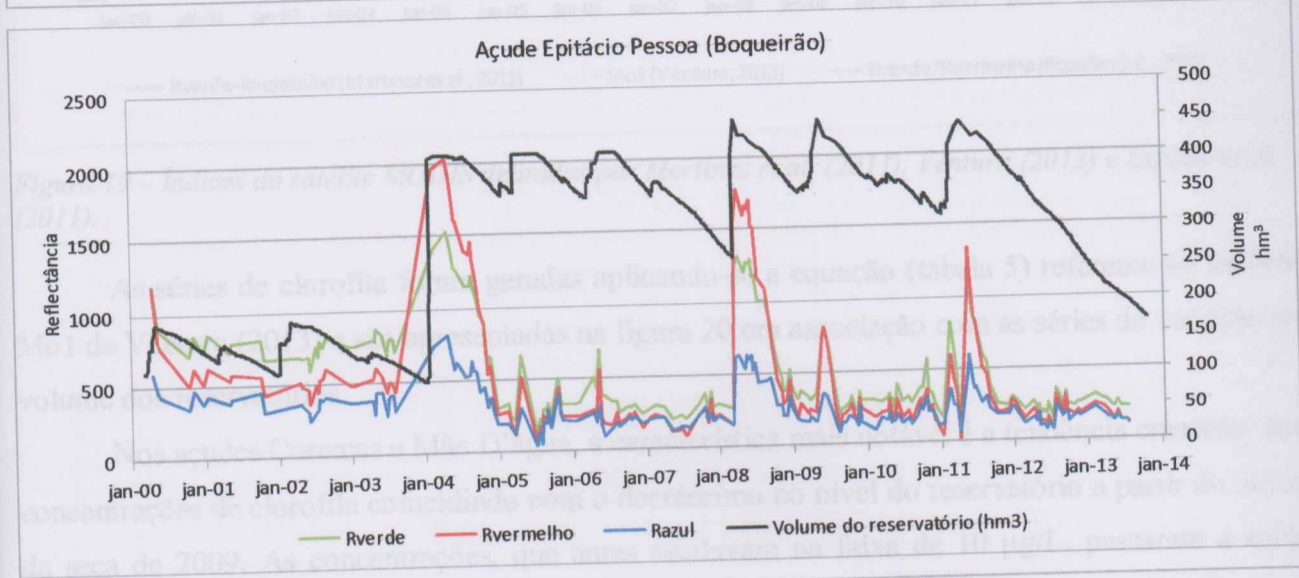
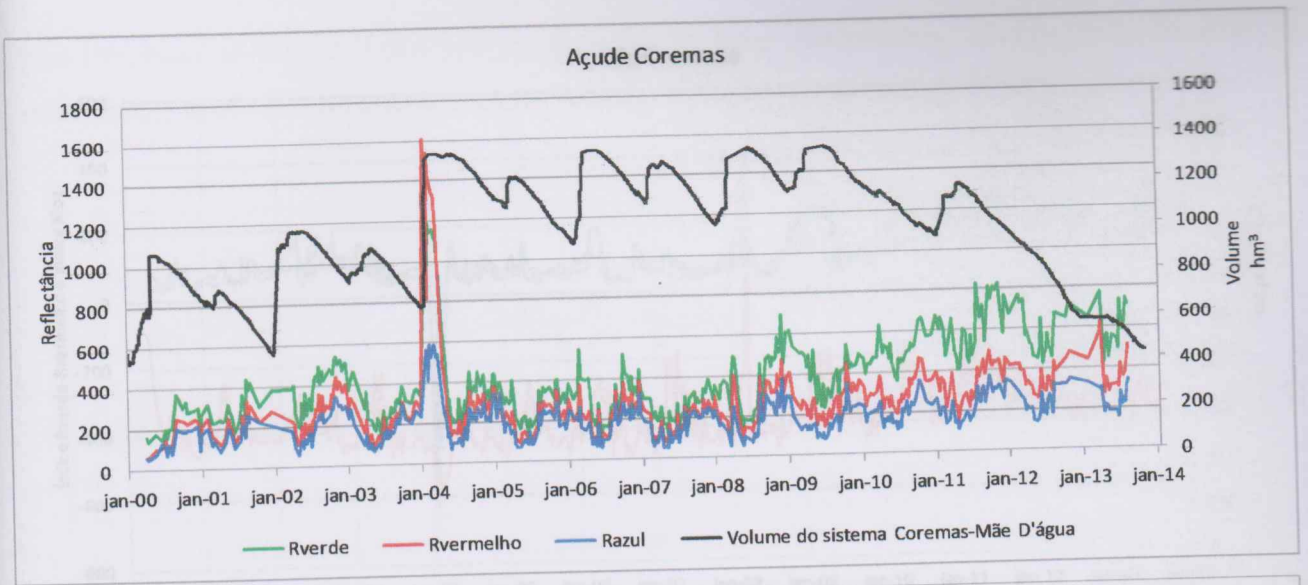


Figura 18– Séries da reflectância da água para as bandas do sensor MODIS nos comprimentos de onda do azul (banda 3), do verde (banda 4) e do vermelho (banda 1) e o volume dos açudes.



Instituto de Geociências  
Universidade de Brasília

- 5.7.1 Indicação de espessura
- 5.8 Linha de pouso
- 5.9 Linha de taxi
- 5.10 Balsa
- 5.11 Torre de controle
- 5.12 Área de escape
- 5.13.1 Stopway
- 5.13 Área de estacionamento
- 5.13.2 Área de estacionamento
- 5.13.3 Área de estacionamento
- 5.13.4 Área de estacionamento
- 5.13.5 Área de estacionamento
- 5.13.6 Área de estacionamento
- 5.13.7 Área de estacionamento
- 5.13.8 Área de estacionamento
- 5.13.9 Área de estacionamento
- 5.13.10 Área de estacionamento
- 5.13.11 Área de estacionamento
- 5.13.12 Área de estacionamento
- 5.13.13 Área de estacionamento
- 5.13.14 Área de estacionamento
- 5.13.15 Área de estacionamento
- 5.13.16 Área de estacionamento
- 5.13.17 Área de estacionamento
- 5.13.18 Área de estacionamento
- 5.13.19 Área de estacionamento
- 5.13.20 Área de estacionamento
- 5.13.21 Área de estacionamento
- 5.13.22 Área de estacionamento
- 5.13.23 Área de estacionamento
- 5.13.24 Área de estacionamento
- 5.13.25 Área de estacionamento
- 5.13.26 Área de estacionamento
- 5.13.27 Área de estacionamento
- 5.13.28 Área de estacionamento
- 5.13.29 Área de estacionamento
- 5.13.30 Área de estacionamento
- 5.13.31 Área de estacionamento
- 5.13.32 Área de estacionamento
- 5.13.33 Área de estacionamento
- 5.13.34 Área de estacionamento
- 5.13.35 Área de estacionamento
- 5.13.36 Área de estacionamento
- 5.13.37 Área de estacionamento
- 5.13.38 Área de estacionamento
- 5.13.39 Área de estacionamento
- 5.13.40 Área de estacionamento
- 5.13.41 Área de estacionamento
- 5.13.42 Área de estacionamento
- 5.13.43 Área de estacionamento
- 5.13.44 Área de estacionamento
- 5.13.45 Área de estacionamento
- 5.13.46 Área de estacionamento
- 5.13.47 Área de estacionamento
- 5.13.48 Área de estacionamento
- 5.13.49 Área de estacionamento
- 5.13.50 Área de estacionamento
- 5.13.51 Área de estacionamento
- 5.13.52 Área de estacionamento
- 5.13.53 Área de estacionamento
- 5.13.54 Área de estacionamento
- 5.13.55 Área de estacionamento
- 5.13.56 Área de estacionamento
- 5.13.57 Área de estacionamento
- 5.13.58 Área de estacionamento
- 5.13.59 Área de estacionamento
- 5.13.60 Área de estacionamento
- 5.13.61 Área de estacionamento
- 5.13.62 Área de estacionamento
- 5.13.63 Área de estacionamento
- 5.13.64 Área de estacionamento
- 5.13.65 Área de estacionamento
- 5.13.66 Área de estacionamento
- 5.13.67 Área de estacionamento
- 5.13.68 Área de estacionamento
- 5.13.69 Área de estacionamento
- 5.13.70 Área de estacionamento
- 5.13.71 Área de estacionamento
- 5.13.72 Área de estacionamento
- 5.13.73 Área de estacionamento
- 5.13.74 Área de estacionamento
- 5.13.75 Área de estacionamento
- 5.13.76 Área de estacionamento
- 5.13.77 Área de estacionamento
- 5.13.78 Área de estacionamento
- 5.13.79 Área de estacionamento
- 5.13.80 Área de estacionamento
- 5.13.81 Área de estacionamento
- 5.13.82 Área de estacionamento
- 5.13.83 Área de estacionamento
- 5.13.84 Área de estacionamento
- 5.13.85 Área de estacionamento
- 5.13.86 Área de estacionamento
- 5.13.87 Área de estacionamento
- 5.13.88 Área de estacionamento
- 5.13.89 Área de estacionamento
- 5.13.90 Área de estacionamento
- 5.13.91 Área de estacionamento
- 5.13.92 Área de estacionamento
- 5.13.93 Área de estacionamento
- 5.13.94 Área de estacionamento
- 5.13.95 Área de estacionamento
- 5.13.96 Área de estacionamento
- 5.13.97 Área de estacionamento
- 5.13.98 Área de estacionamento
- 5.13.99 Área de estacionamento
- 5.13.100 Área de estacionamento

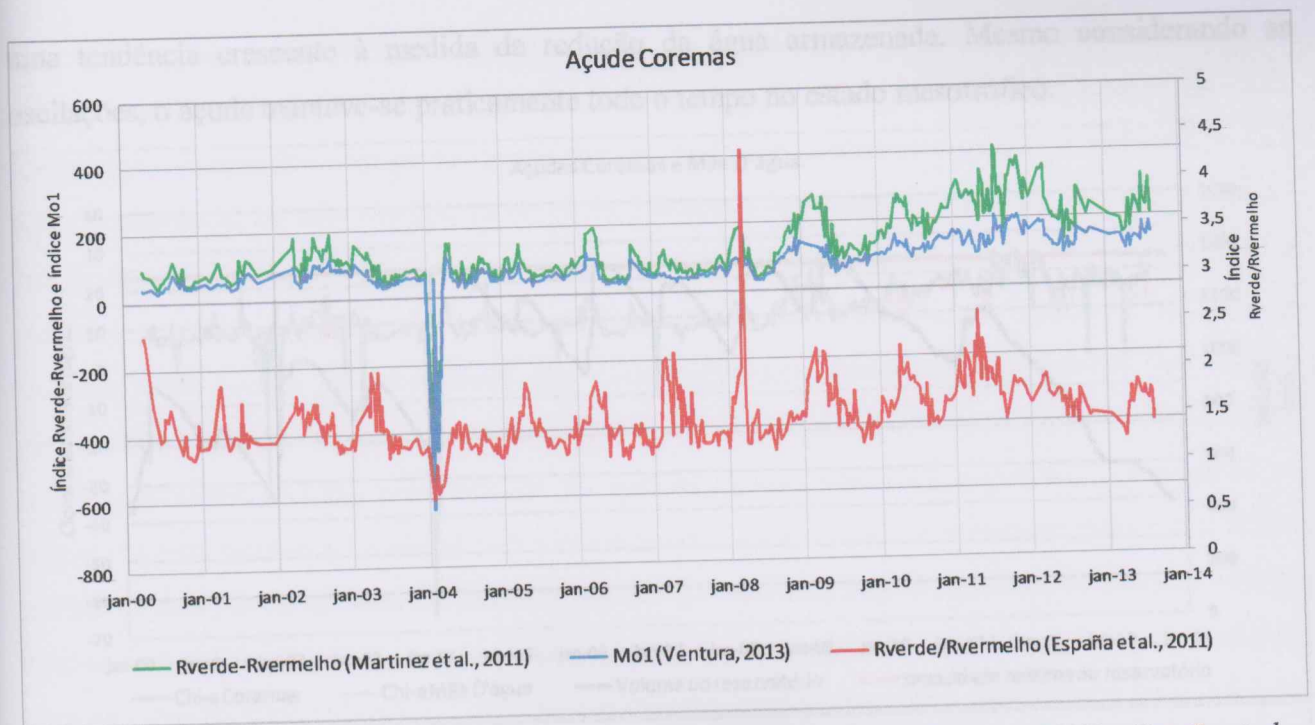


Figura 19 – Índices do satélite MODIS definidos por Martinez et al. (2011), Ventura (2013) e España et al. (2011).

As séries de clorofila foram geradas aplicando-se a equação (tabela 5) referente ao modelo Mo1 de Ventura (2013) e são apresentadas na figura 20 em associação com as séries de variação do volume dos reservatórios.

Nos açudes Coremas e Mãe D'água, a característica mais notável é a tendência crescente nas concentrações de clorofila coincidindo com o decréscimo no nível do reservatório a partir do início da seca de 2009. As concentrações, que antes oscilavam na faixa de 10 µg/L, passaram a subir gradualmente, chegando a ultrapassar 20 µg/L e se estabilizando na faixa entre 10 e 20 µg/L. Essa tendência pode ser explicada pela falta de renovação das águas do reservatório em decorrência de anos consecutivos de seca, mudando o estado trófico do açude de mesotrófico para eutrófico.

No açude Epitácio Pessoa, é notável a existência de dois patamares nos níveis de clorofila estimada, separados pela mudança no volume do reservatório em janeiro de 2004. O patamar mais alto, com clorofila na faixa de 20 µg/L, ocorre no período de 2000 a 2003, quando os volumes do reservatório encontravam-se muito baixos em decorrência de anos consecutivos de seca. O novo patamar possui concentrações na faixa de 10 µg/L, o qual se estabelece após o enchimento do reservatório devido a chuvas intensas no ano de 2004. No geral, essa mudança corresponde a uma mudança no estado trófico do açude, que muda do estado eutrófico para o mesotrófico. O estabelecimento do novo patamar pode ser explicado pela renovação das águas do reservatório.

No açude Engenheiro Ávidos, as concentrações da clorofila-a estimada oscilaram entre 5 e 10 µg/L. A série exibe uma queda nos valores de Chl-a no início dos períodos chuvosos, seguida de

Figura 20 – Série histórica da clorofila estimada pelo modelo Mo1 de Ventura (2013)

uma tendência crescente à medida da redução da água armazenada. Mesmo considerando as oscilações, o açude manteve-se praticamente todo o tempo no estado mesotrófico.

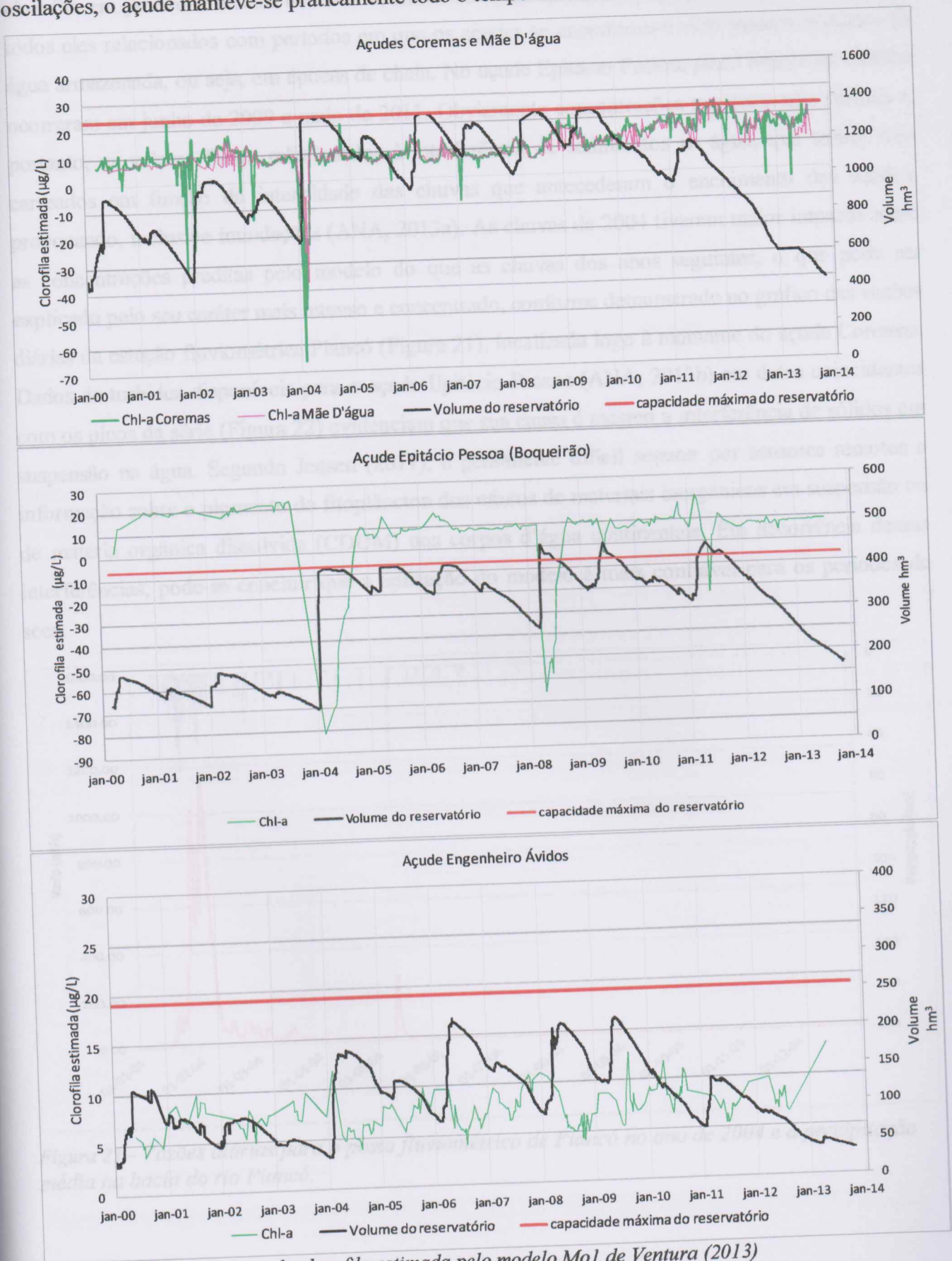


Figura 20 – Série histórica da clorofila estimada pelo modelo Mo1 de Ventura (2013)

Em quase todos os reservatórios, foi notável a ocorrência de picos negativos na série de clorofila em janeiro-fevereiro de 2004 e, de forma menos pronunciada, em março-abril de 2008, todos eles relacionados com períodos em que os açudes se encontravam com valores máximos de água armazenada, ou seja, em épocas de cheia. No açude Epitácio Pessoa, picos negativos também ocorreram em junho de 2009 e maio de 2011. Obviamente concentrações negativas não existem e, portanto, os valores foram relacionados à interferência de sedimentos na água, que teriam sido carregados em função da intensidade das chuvas que antecederam o enchimento dos açudes, provocando, inclusive inundações (ANA, 2013a). As chuvas de 2004 tiveram maior impacto sobre as concentrações preditas pelo modelo do que as chuvas dos anos seguintes, o que pode ser explicado pelo seu caráter mais intenso e concentrado, conforme demonstrado no gráfico das vazões diárias da estação fluviométrica Piancó (Figura 21), localizada logo à montante do açude Coremas. Dados de turbidez disponíveis para o açude Epitácio Pessoa (ANA, 2013b) em datas coincidentes com os picos da série (Figura 22) evidenciam que sua causa é mesmo a interferência de sólidos em suspensão na água. Segundo Jensen (2011), é geralmente difícil separar por sensores remotos a informação sobre o pigmento do fitoplâncton dos efeitos de materiais inorgânicos em suspensão ou de matéria orgânica dissolvida (CDOM) nos corpos d'água continentais. Em decorrência dessas interferências, pode-se concluir que a aplicação do modelo é mais confiável para os períodos de seca.



Figura 21 - Vazões diárias para o posto fluviométrico de Piancó no ano de 2004 e a precipitação média na bacia do rio Piancó.

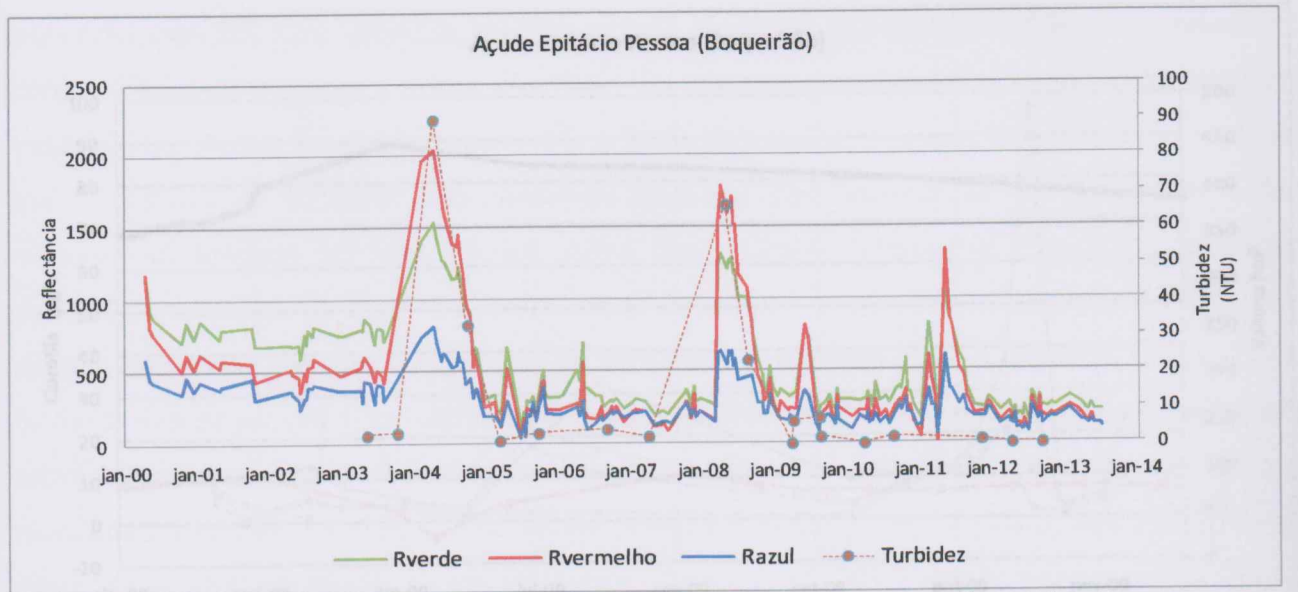


Figura 22 - Picos de turbidez associados aos picos de reflectância no açude açude Epitácio Pessoa.

Por fim, os dados de clorofila-a estimada para o açude Epitácio Pessoa foram comparados com dados de clorofila medida disponíveis na literatura (ANA/ITEP, 2009; Araújo Júnior, 2009), conforme ilustrado nas figuras 23 e 24. Em relação aos dados de Araújo Júnior (2009), que representam os valores médios para períodos de seca e chuva, a maioria dos valores estimados se apresentou superestimado. O único ponto ajustado foi o dado correspondente à seca do período de novembro de 2005 a março de 2006, quando a clorofila se apresentou mais elevada (média de 9,96  $\mu\text{g/L}$ ) que nos demais períodos. Este resultado está de acordo com o observa Ventura (2013), de que o modelo possui a tendência de superestimar a concentração de clorofila *a* (*Chla*), principalmente no caso das concentrações mais baixas.

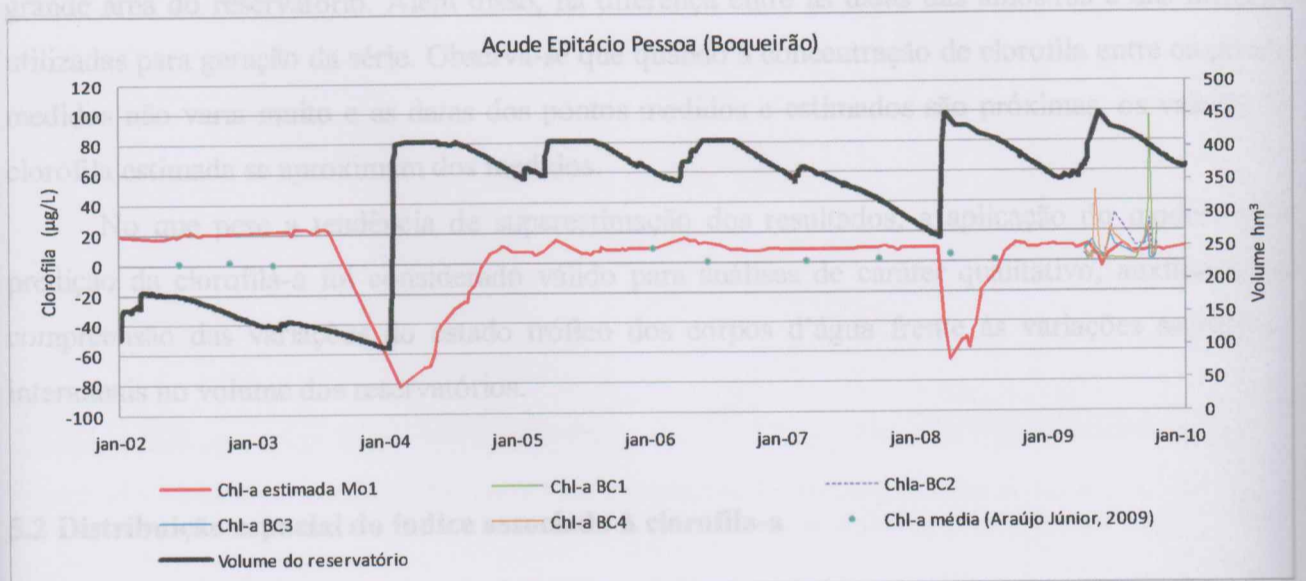


Figura 23- Comparação da série de clorofila estimada pelo modelo Mo1 com dados de clorofila medidos.

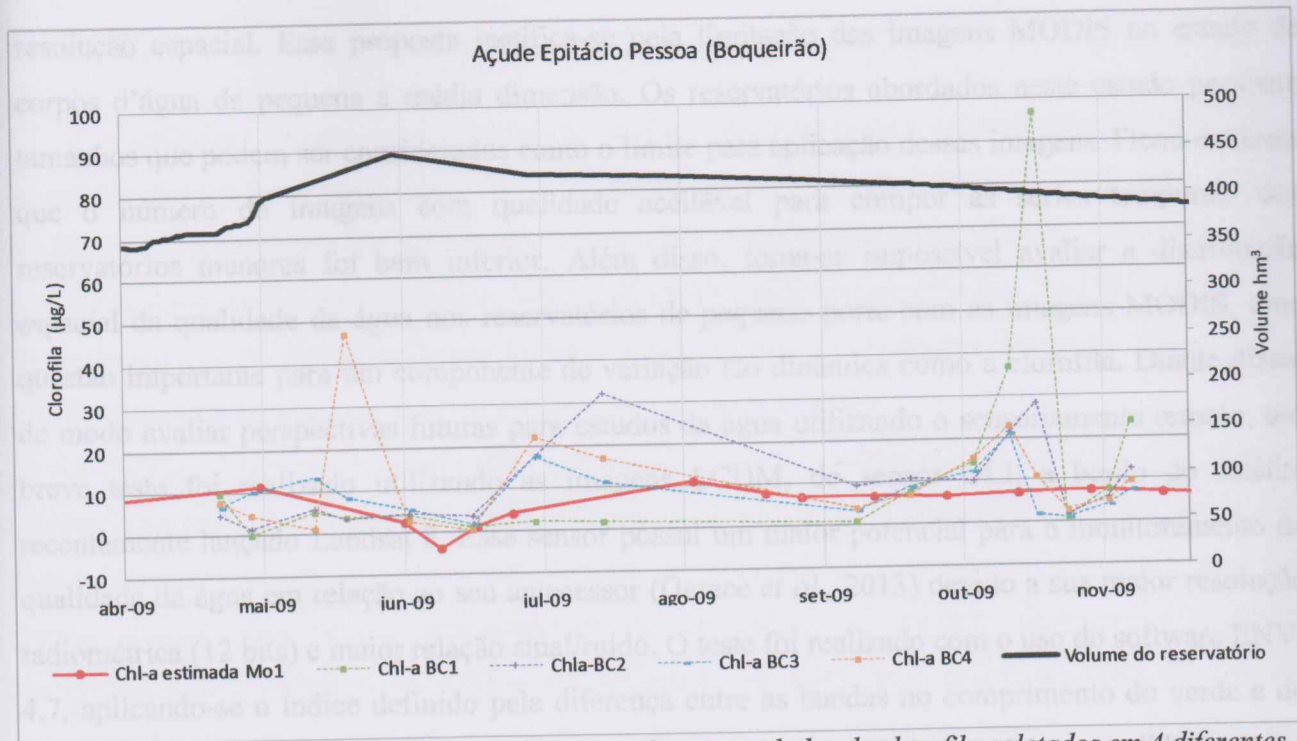


Figura 24 - Comparação da série de clorofila estimada com os dados de clorofila coletados em 4 diferentes pontos do reservatório. BC1=Próximo à barragem (815489E; 9171252N); BC2= Entre Bredos e Campo Redondo (813814E, 9172806N); BC3 = Entre Pedra Branca e Mirador (809102E; 9169696N);BC4= Poço Grande (805517E; 9166628N).

Em relação aos dados de 2009 (Figura 24), distribuídos nos períodos de seca e chuva, houve uma variação muito grande nos dados medidos e estimados. Provavelmente isso ocorreu porque os dados medidos são pontuais, com concentrações que variam muito de um local para o outro, enquanto os dados estimados correspondem à média de um grupo de pixels, representando uma grande área do reservatório. Além disso, há diferença entre as datas das amostras e das imagens utilizadas para geração da série. Observa-se que quando a concentração de clorofila entre os pontos medidos não varia muito e as datas dos pontos medidos e estimados são próximas, os valores de clorofila estimada se aproximam dos medidos.

No que pese a tendência de superestimação dos resultados, a aplicação do modelo para predição da clorofila-a foi considerado válido para análises de caráter qualitativo, auxiliando na compreensão das variações do estado trófico dos corpos d'água frente às variações sazonais e interanuais no volume dos reservatórios.

## 5.2 Distribuição espacial do índice associado à clorofila-a

De modo a avaliar as perspectivas futuras da utilização do sensoriamento remoto para monitoramento de corpos d'água menores, surgiu ao final do trabalho como uma tarefa extra ao escopo inicialmente proposto, a aplicação do índice associado à clorofila-a em imagens de maior



resolução espacial. Essa proposta justifica-se pela limitação das imagens MODIS no estudo de corpos d'água de pequena a média dimensão. Os reservatórios abordados neste estudo possuem tamanhos que podem ser considerados como o limite para aplicação dessas imagens. Ficou evidente que o número de imagens com qualidade aceitável para compor as séries temporais dos reservatórios menores foi bem inferior. Além disso, torna-se impossível avaliar a distribuição espacial da qualidade da água nos reservatórios de pequeno porte com as imagens MODIS, uma questão importante para um componente de variação tão dinâmica como a clorofila. Diante disso, de modo a avaliar perspectivas futuras para estudos da água utilizando o sensoriamento remoto, um breve teste foi realizado utilizando as imagens LCDM, do sensor OLI, a bordo do satélite recentemente lançado Landsat 8. Esse sensor possui um maior potencial para o monitoramento da qualidade da água em relação ao seu antecessor (Gerace *et al.*, 2013) devido a sua maior resolução radiométrica (12 bits) e maior relação sinal/ruído. O teste foi realizado com o uso do software ENVI 4.7, aplicando-se o índice definido pela diferença entre as bandas no comprimento do verde e do vermelho, no caso desse sensor, as bandas 3 e 4. A aplicação do índice foi antecedida por uma correção atmosférica simplificada, aplicando o método Empírico *Quick Atmospheric Correction*. O mesmo procedimento foi realizado com uma imagem do sensor TM (neste caso, as bandas 2 e 3), de maneira a poder comparar os resultados. É evidente a melhora sensível da imagem landsat 8 em relação ao landsat 5. No açude Epitácio Pessoa, os valores obtidos pelo índice, proporcionais à concentração da clorofila, apresentaram-se distribuídos de maneira bem coerente na imagem LCDM, indicando um decréscimo da clorofila-a no sentido de montante para a barragem. Na imagem TM, a presença de ruídos mascara a graduação do índice, dificultando a análise.

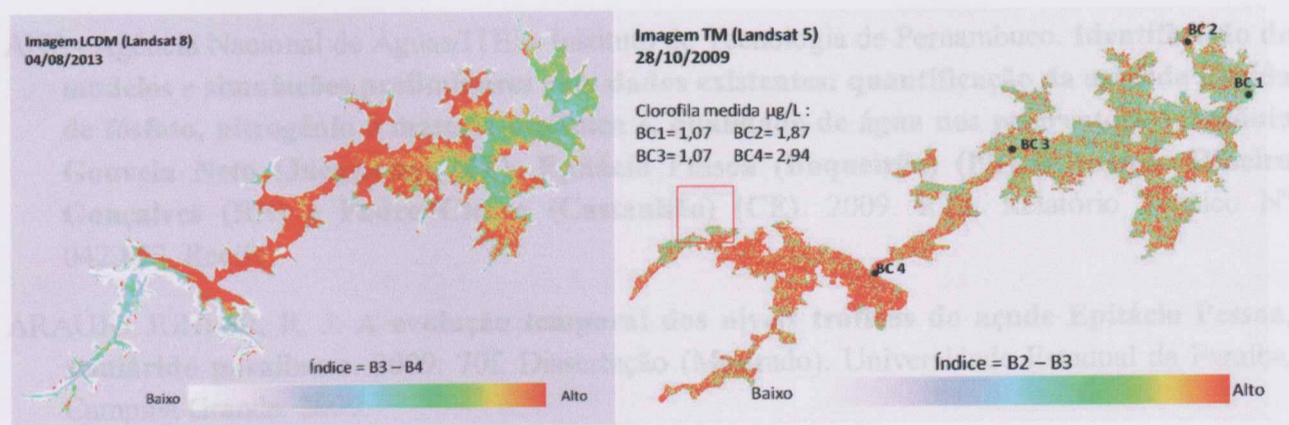


Figura 25 – Imagens obtidas pela diferença entre as reflectâncias no comprimento do verde e do vermelho para imagens do satélite Landsat 8 e Landsat 5, aplicados à área do Açude Epitácio Pessoa.

## 6. CONCLUSÃO

A utilização de uma série de imagens MODIS para monitorar a concentração de clorofila-a em açudes de pequeno a médio porte na região semiárida paraibana se mostrou eficiente para análises qualitativas dos processos de eutrofização e sua relação com as variações sazonais e interanuais no volume de água armazenado. As séries temporais obtidas pela combinação das bandas espectrais do verde (banda 4) e do vermelho (banda 1) desse sensor mostraram oscilações altamente relacionáveis com eventos extremos, como as secas e cheias que assolam a região.

Porém, o modelo utilizado não apresentou respostas confiáveis na predição dos valores absolutos de clorofila. O autor do modelo (Ventura, 2013) já havia desaconselhado sua utilização para aplicações precisas, já que a tendência seria de superestimar os resultados, principalmente em corpos d'água com baixas concentrações de clorofila-a. O modelo demonstrou também susceptibilidade à presença de sólidos em suspensão na água, pois houve predição de valores negativos de clorofila-a em períodos de chuvas intensas. Acrescenta-se ainda que o tamanho dos corpos d'água abordados nesse estudo representam o limite da aplicabilidade das imagens MODIS de 500m de resolução espacial.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA- Agência Nacional de Águas. **Plano de recursos hídricos da bacia do rio Piranhas-Açu: Diagnóstico**. 2013a. Relatório Parcial Interno RP3, 985 pp.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. 2013b.
- ANA- Agência Nacional de Águas/ITEP- Instituto de Tecnologia de Pernambuco. **Identificação de modelos e simulações preliminares com dados existentes; quantificação da entrada e saída de fósforo, nitrogênio e matéria orgânica e, qualidade de água nos reservatórios Antônio Gouveia Neto (Jucazinho) (PE), Epitácio Pessoa (Boqueirão) (PB), Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Padre Cícero (Castanhão) (CE)**. 2009. RT3. Relatório Técnico N° 042.852, Recife.
- ARAÚJO JÚNIOR, R. J. **A evolução temporal dos níveis tróficos do açude Epitácio Pessoa, semiárido paraibano**. 2009. 70f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2009.
- ANDERSON, L.O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y.E.; ARAI, E.; CARVALHO JUNIOR, O.A. **Sensor MODIS: uma abordagem geral**. São José dos Campos: INPE, 2003.
- CARLSON, R. E. **A trophic state index for lakes**. 1977. *Limnology and Oceanography*, 22, p. 361-369.

CUNHA, C. L. N.; CARNEIRO, C.; GOBBI, E. F.; ANDREOLI, C. V. **Eutrofização em reservatórios: Gestão Preventiva. Estudo Interdisciplinar na Bacia do Rio Verde, PR.** Editora UFPR. 2013. 516 p.

ESPAÑA, M. C. M.; MARTINEZ, J. M.; MOREIRA-TURCQ, P.; BONNET, M. P., VILLAR, R. E.; GAMUNDI, A. V.; ABRIL, G.; SEYLER, P. 2011. **Monitoreo espacial y temporal del estado trófico de los lagos de planicies de inundación en la Amazonía central mediante sensores remotos.** In: INPE, XV Simp. Bras. de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, Anais, p.5324.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia.** 2. Ed., São Paulo: Interciência, 1998, 602 p.

DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. A.; & RUNDQUIST; D. C. 2003. **Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters.** *Geophysical Research Letters*, 30(18). doi:10.1029/2003GL018065

FERNANDES, L. F.; LAGOS, P. D.; WOSIAK, A. C.; PACHECO, C. V.; DOMINGUES, L.; ZENHDER-ALVES, L.; COQUEMALA, V. Comunidades fitoplanctônicas em ambientes lênticos. In: ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C. **Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizados.** 1. Ed. Curitiba: ABES, 2005. p. 303-366.

GERACE, A., SCHOTT, J. R., NEVINS, R. **Increased potencial to monitor water quality in the near-shore environment with Landsat's next-generation satellite.** *Journal of Applied Remote Sensing*, v.7. 2013.

GITELSON, A. A., DALL'OLMO, G., MOSES, W., RUNDQUIST, D. C., BARROW, T., FISHER, T. R., GURLIN, D. 2008. **A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation.** *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3582–3593. doi:10.1016/j.rse.2008.04.015

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais.** 2. Ed. São José dos Campos-SP: Parênteses, 2011. 598p.

MARTINEZ, J. M., VENTURA, D., VIEIRA, M. R., ATTAYDE, J. L., BUBEL, A. P., COIMBRA, M. R., OLIVEIRA, E. 2011. **Satellite-based monitoring of reservoir eutrophication in the Brazil Semi-arid region.** XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, 2011, *Anais*, p5247

LAMPARELLI, M. C. 2004. **Graus de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento.** São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, USP. 235 p.

NOVO, E.M.L.M.; BARBOSA, C.; FREITAS, R.M.. **Sistemas aquáticos continentais.** In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Orgs.) **O Sensor MODIS e suas aplicações no Brasil.** São José dos Campos: Parêntese, 2007. p. 265-275.

RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. **O Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil.** 1.ed. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 425 p.

MACEDO, D. R. G. **Microcistina na água e biomagnificação em peixes de reservatórios de abastecimento público do estado da Paraíba.** 2009. 82f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2009.

MENEZES, P. H. B. J. **Estudo da dinâmica espaço-temporal do fluxo de sedimentos a partir das propriedades ópticas das águas no reservatório de Três Marias-MG.** 2013. 112f. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** 4 ed. Edgard Blücher, 2010.

PETRUCIO, M. M., MEDEIROS, A. O., ROSA, C. A. E BARBOSA F. A. R. **Trophic State and Microorganisms Community of major Sub-Basins of the Middle Rio Doce Basin, Southeast Brazil.** *Braz. Arch. Biol. Technol.*, Curitiba, v. 48, n.4:p. 625-633, 2005.

TOLEDO, JR., A.P. **Informe preliminar sobre os estudos para obtenção de um índice para a avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais.** São Paulo, CETESB, 12 p. (Relatorio Interno) 1990.

VENTURA, D. L. T. **Uso do sensoriamento remoto para monitoramento da concentração de clorofila a em açudes do semiárido.** 2013. 61f. Dissertação (Mestrado), Programa de pós-graduação em ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

VILLAR, R. E. **Monitoramento das dinâmicas espaciais e temporais dos fluxos sedimentares na bacia amazônica a partir de imagens de satélite.** 2013. 226f. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.