



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.14.17.42-TDI

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA DINÂMICA  
SAZONAL DAS PROPRIEDADES BIO-ÓPTICAS DO  
RESERVATÓRIO DE FUNIL COM APOIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO, DADOS IN SITU E  
MODELOS ÓPTICOS**

Pétala Bianchi Augusto-Silva

Dissertação de Mestrado em Senso-  
riamento Remoto, orientada pelos  
Drs. José Luiz Stech, e Enner He-  
renio Alcântara, aprovada em 29 de  
maio de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E57SM2>>

INPE  
São José dos Campos  
2013

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.14.17.42-TDI

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA DINÂMICA  
SAZONAL DAS PROPRIEDADES BIO-ÓPTICAS DO  
RESERVATÓRIO DE FUNIL COM APOIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO, DADOS IN SITU E  
MODELOS ÓPTICOS**

Pétala Bianchi Augusto-Silva

Dissertação de Mestrado em Senso-  
riamento Remoto, orientada pelos  
Drs. José Luiz Stech, e Enner He-  
renio Alcântara, aprovada em 29 de  
maio de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E57SM2>>

INPE  
São José dos Campos  
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Si38c Augusto-Silva, Pétala Bianchi.  
Caracterização e avaliação da dinâmica sazonal das propriedades bio-ópticas do reservatório de Funil com apoio de sensoriamento remoto, dados in situ e modelos ópticos / Pétala Bianchi Augusto-Silva. – São José dos Campos : INPE, 2013.  
xxviii + 155 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.14.17.42-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. José Luiz Stech, e Enner Herenio Alcântara.

1. monitoramento da qualidade da água. 2. reflectância de sensoriamento remoto. 3. propriedades ópticas inerentes. 4. componentes opticamente ativos. I.Título.

CDU 528.8:556.55 (815.3)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Sensoriamento Remoto**

Dra. Evelyne Márcia Leão de Moraes Novo

  
\_\_\_\_\_  
*Presidente / INPE / SJC Campos - SP*

Dr. José Luiz Stech

  
\_\_\_\_\_  
*Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP*

Dr. Enner Herenio de Alcântara

  
\_\_\_\_\_  
*Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP*

Dr. Cláudio Clemente de Faria Barbosa

  
\_\_\_\_\_  
*Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP*

Dra. Maria do Carmo Calijuri

  
\_\_\_\_\_  
*Convidado(a) / USP / São Carlos - SP*

*Este trabalho foi aprovado por:*

*maioria simples*

*unanimidade*

Aluno (a): **Pétala Bianchi Augusto Silva**

**São José dos Campos, 29 de Maio de 2013**



*“O ato de solucionar um problema de pesquisa no campo da física implica adotar uma suposição atrás da outra, uma aproximação após a outra. Esses grandes saltos de imaginação costumam ser chamados de ‘pensar fora da caixa’. Eles envolvem a capacidade da pessoa de ir adiante, seguir sua intuição e aceitar que ela não compreende plenamente o que está fazendo. E, acima de tudo, é preciso que acredite em si mesma.”*

*Leonard Mlodinow em O arco-íris de Feynman*

*“Tudo que você fizer na sua vida será insignificante, mas é muito importante que você o faça, ninguém fará por você.”*

*Gandhi*





*À Julieta.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus pela oportunidade dessa existência e a meus pais por estarem ao meu lado sempre. Sem falar no resto da família, porque eu realmente tenho uma família maravilhosa. Tia Neusa, tio Cridão, tio Zé e tia Adriana, obrigada por formarem sempre uma rede de proteção junto a meus pais para que eu pudesse seguir o caminho que eu escolhesse.

Aos meus orientadores Stech e Enner eu agradeço pela simples e crucial oportunidade de desenvolver este trabalho, pela confiança depositada e pela pronta ajuda em todos os momentos de dificuldade que eu e esta pesquisa enfrentamos. Esta pesquisa me mostrou o caminho que eu quero seguir e eu nunca esquecerei que vocês me colocaram e me guiaram neste caminho.

Não foi fácil, mas isso todos que me acompanharam sabem. Teria sido impossível sem toda a ajuda que recebi do Cláudio. Obrigada por ter me ajudado e me incitado a seguir em frente mais e mais adiante. Obrigada pelos diversos momentos em que se sentou ao meu lado pra resolver um problema qualquer. Obrigada!

Eu sempre acreditei em anjos, aquelas pessoas que irradiam uma aura de paz e tranquilidade sempre. Essas pessoas me mostram a bondade do mundo. Eu agradeço à Evlyn por ser um desses anjos e acreditar no caminho da paz e do bem.

Por trás desta dissertação existe toda uma equipe que sacrificou finais de semana, madrugou muitos dias, comeu mal no barco com as mãos sujas, aturou-me todo esse tempo, esforçou-se braçal e intelectualmente e em alguns momentos correu risco de morte na estrada. Rafa, Joaquim, Carlos, Lino, Panda, Zé, Dani e Annia, vocês foram magníficos e nada disso teria sido possível sem vocês. Cada campanha de campo foi alegre e bem sucedida pela ajuda de vocês.

Ao pessoal da sala, Marcelo, Arley e Igor os agradecimentos são os mais variados possíveis, mas principalmente pela companhia, risadas e gritos de todos os dias.

Ao Thiago pela companhia e apoio principalmente no primeiro ano de mestrado.

À minha família de amigos de Ribeirão Preto agradeço pelo suporte a mim e à minha família de sangue quando não pude estar presente. Benti, Ila, Karine e Ju, sem vocês este trabalho teria sido muito mais difícil.

Não podia faltar aquela pessoa que segura a barra em todos os momentos. Meu companheiro, Céu! Obrigada!

Ao INPE e particularmente ao Departamento de Sensoriamento Remoto, agradeço a oportunidade de estudo. À CAPES agradeço pelo apoio financeiro. À Fapesp e ao CNPq agradeço o suporte financeiro provido pelos processos 2011/19523-8 e 471223/2011-5, respectivamente. À Aneel agradeço o apoio pelo projeto 8000003629. Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) para Mudanças Climáticas, agradeço o suporte concedido pelo projeto CNPq 573797/2008-0 e pelo projeto FAPESP 2008/57719-9.

## RESUMO

O gerenciamento do uso sustentável dos recursos hídricos depende fundamentalmente de informações sobre a qualidade da água e de como esta qualidade se altera ao longo do tempo. Tradicionalmente, o estudo da qualidade da água nos sistemas se baseia na coleta e análise de um número limitado de amostras com representatividade espacial limitada. Essa característica inerente do processo de amostragem torna-se crítica no caso de grandes reservatórios. Para sanar essa ausência de representatividade espacial, o sensoriamento remoto pode ser uma ferramenta poderosa no estudo do meio aquático por capturar, por meio da resposta espectral, a variabilidade dos componentes opticamente ativos presentes na água. O estudo da cor do oceano já evoluiu bastante nas últimas décadas, o desafio agora reside no sensoriamento remoto de águas interiores, devido à complexidade dos processos ambientais nessas águas. Neste contexto, esta pesquisa almejou contribuir ao avanço dos estudos da interação da luz com os sistemas aquáticos continentais. Duas campanhas de campo foram realizadas para a caracterização bio-óptica do reservatório de Funil (44° 55' Latitude-W; 21° 05' Longitude-S) em duas condições ambientais distintas. Essa etapa do trabalho objetivou demonstrar a complexidade do ambiente pelo registro espectral das interações da luz com o meio. Como uma segunda etapa, foi ainda testada a aplicabilidade de um modelo de simulação da Reflectância de Sensoriamento Remoto ( $R_{sr}$ ) a partir das propriedades ópticas inerentes. Essas propriedades são aquelas que traduzem as características singulares do meio em estudo. O objetivo aqui foi avaliar se o modelo escolhido, desenvolvido por Gordon et al. (1988), inicialmente proposto para águas oceânicas do Caso 1, cujo componente dominante sobre a cor da água é o fitoplâncton e os outros componentes covariam com este; poderia ser aplicado em águas complexas do Caso 2, que não possuem um componente dominante exclusivo. Isso é importante, pois a possibilidade de estimar esse parâmetro com o uso das propriedades ópticas inerentes permitirá no futuro obter essas propriedades a partir da  $R_{sr}$  registrada por um satélite em órbita. Portanto, avanços no desenvolvimento e parametrização de modelos robustos para simular a  $R_{sr}$ , permitirão um monitoramento confiável da qualidade da água por satélites. Como resultado essa pesquisa permitiu também visualizar como as condições ambientais interferem nas interações da luz com o ambiente. Além disso, foi também possível perceber que o modelo de simulação da  $R_{sr}$  escolhido pode ser usado em águas complexas como as da área de estudo desde que as propriedades ópticas inerentes sejam determinadas de forma acurada.



# **CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF SEASONAL DYNAMICS OF BIO-OPTICAL PROPERTIES ON FUNIL RESERVOIR SUPPORTED BY REMOTE SENSING, *IN SITU* DATA AND OPTICAL MODELS**

## **ABSTRACT**

The management of the sustainable use of water resources depends crucially on the information about water quality and how it changes over time. Traditionally, the study of water quality in the systems is based on the collection and analysis of a limited number of samples with limited spatial representation. This inherent characteristic of the sampling process becomes critical in the case of large reservoirs. To solve this lack of spatial representation, remote sensing can be a powerful tool in the study of the aquatic environment by capturing, through the spectral response, the variability of optically active components present in water. The study of ocean color has improved significantly in the last decades, the challenge now lies in the remote sensing of inland waters, due to the complexity of the environmental processes existing in these waters. Set in this context, this research aimed to contribute to the advance of the studies on the interaction of the light with continental aquatic systems. Two field campaigns were carried out for the bio-optical characterization of Funil's reservoir (44°55' Latitude-W; 21°05' Longitude-S) in two different environmental conditions. This stage of the study meant to demonstrate the complexity of the environment by recording the spectral interactions of the light with the medium. As a second step, it was still tested the applicability of an estimation model for Remote Sensing Reflectance ( $R_{rs}$ ) using inherent optical properties. These properties are those which reflect the unique characteristics of the medium under study. The goal here was to evaluate if the chosen model, developed by Gordon et al. (1988), originally proposed for Case 1 ocean waters, whose dominant component on the color of the water is the phytoplankton, and the other components covary with it; could be applied in Case 2 complex waters, that has not a unique dominant component. This is important because the ability to estimate this parameter through the use of inherent optical properties will allow us, in the future, to achieve these properties from the  $R_{rs}$  recorded by an orbiting satellite. Therefore, advances in the development and parameterization of robust models to simulate  $R_{rs}$ , will allow a reliable monitoring of water quality by satellites. As a result, this research allowed us to visualize how environmental conditions affect the interactions of the light with the medium. Furthermore, it was also possible to realize that the estimation model chosen for  $R_{rs}$  can be used in complex waters as those in the study area as long as the inherent optical properties were accurately determined.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1: Ângulos que definem a direção no campo de luz. Onde: $\theta$ é o ângulo zenital, $\phi$ é o ângulo azimutal, e $\theta_n$ é o ângulo com o nadir.	6
Figura 3.2: Representação esquemática do ângulo sólido. Onde: $\omega$ é o ângulo sólido, $dA_{esf}$ é o elemento de área esférico, e $r$ é o raio da esfera...	6
Figura 3.3: Comportamento espectral dos COA.....	20
Figura 3.4: Coeficiente de absorção espectral da água pura. ....	21
Figura 4.1: Localização do reservatório de Funil.....	33
Figura 5.1: Espectroradiômetros da TriOS. ....	37
Figura 5.2: Esquema óptico genérico dos espectroradiômetros da TRIOS.....	38
Figura 5.3: Esquema óptico do RAMSES-ARC.....	39
Figura 5.4: Esquema óptico do RAMSES-ACC.....	39
Figura 5.5: Esquema de operação em campo.....	40
Figura 5.6: Espectroradiômetros da TRIOS em operação. Em destaque o RAMSES-ARC medindo a radiância emergente da água. ....	41
Figura 5.7: Esquema ilustrativo dos componentes do AC-s.....	42
Figura 5.8: AC-S sendo colocado na água.....	43
Figura 5.9: Sonda YSI 6600 em operação. ....	46
Figura 5.10: Fluxograma da primeira parte da pesquisa. ....	47
Figura 5.11: Fluxograma da segunda parte da pesquisa. ....	48
Figura 5.12: Esquema amostral planejado para os trabalhos de campo.....	49
Figura 5.13: Pontos amostrados realizados na primeira campanha de campo.	50
Figura 5.14: Pontos amostrados realizados na segunda campanha de campo. ....	51
Figura 5.15: Pontos amostrais analisados na caracterização bio-óptica.....	52
Figura 5.16: Posicionamento do barco e direção de visada do sensor com o azimute. ....	54
Figura 5.17: Ângulo do sensor com o zênite. ....	54
Figura 5.18: Imagem esquemática de uma coluna d'água em campo. ....	55
Figura 6.1: Box-plots da distribuição das concentrações de: Clorofila-a (Chl-a), Material em Suspensão Total (MST) e Carbono Dissolvido Total (CDT). Campanha de Maio.....	63
Figura 6.2: Box-plots da distribuição das concentrações de: Clorofila-a (Chl-a), Material em Suspensão Total (MST) e Carbono Dissolvido Total (CDT). Campanha de Setembro.....	64

Figura 6.3: Curvas espectrais do Coeficiente de Absorção Total para: (A) Maio; (B) Setembro. ....	65
Figura 6.4: Curvas espectrais do Coeficiente de Atenuação Difusa Vertical Ponderado para: (A) Maio; (B) Setembro. ....	65
Figura 6.5: Curvas espectrais da Reflectância de Sensoriamento Remoto para: (A) Maio; (B) Setembro.....	66
Figura 6.6: Curvas espectrais do Fator de Reflectância para: (A) Maio; (B) Setembro. ....	67
Figura 6.7: Irradiância Descendente para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	69
Figura 6.8: Radiância ascendente para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	70
Figura 6.9: Ilustração da primeira hipótese referente ao ângulo de elevação solar e sua influência sobre a radiação que sensibiliza o sensor. ...	71
Figura 6.10: Esquema ilustrativo da Lei de Snell. ....	73
Figura 6.11: Implicações da Lei de Snell sobre o campo de visada do sensor. (A) Sensor fora da água; (B) Sensor dentro da água. ....	74
Figura 6.12: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	75
Figura 6.13: Coeficiente de absorção total para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	76
Figura 6.14: Coeficiente de atenuação para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	76
Figura 6.15: Coeficiente de espalhamento para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	77
Figura 6.16: Dados Limnológicos da Sonda na coluna d'água do ponto 03 em Maio.....	78
Figura 6.17: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	79
Figura 6.18: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	79
Figura 6.19: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	80
Figura 6.20: Irradiância Descendente para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	82
Figura 6.21: Radiância ascendente para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	83
Figura 6.22: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	84

Figura 6.23: Coeficiente de absorção para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	85
Figura 6.24: Coeficiente de atenuação para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	85
Figura 6.25: Coeficiente de espalhamento para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	86
Figura 6.26: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	87
Figura 6.27: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 08 em Maio.....	87
Figura 6.28: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	88
Figura 6.29: Irradiância Descendente para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	90
Figura 6.30: Radiância ascendente para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	91
Figura 6.31: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	91
Figura 6.32: Coeficiente de absorção para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	92
Figura 6.33: Coeficiente de atenuação para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	92
Figura 6.34: Coeficiente de espalhamento para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	93
Figura 6.35: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	93
Figura 6.36: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	94
Figura 6.37: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	94
Figura 6.38: Curvas espectrais do Coeficiente de Retroespalhamento calculado pelo método de Gallagher (2004) para: (A) Maio; (B) Setembro. ....	95
Figura 6.39: Curvas espectrais do Coeficiente de Retroespalhamento calculado pelo modelo de Jerome et al. (1996) para: (A) Maio; (B) Setembro.	96
Figura 6.40: Curvas espectrais da razão entre a Reflectância de Sensoriamento Remoto obtida pelo modelo de Gordon et al. (1988) com coeficiente de retroespalhamento calculado pelo modelo de Jerome et al. (1996); pela Reflectância de Sensoriamento Remoto medida em campo com os sensores da TRIOS. Para: (A) Maio; (B) Setembro.	97

Figura A.1: Irradiância Descendente para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	110
Figura A. 2: Radiância ascendente para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	110
Figura A. 3: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	111
Figura A. 4: Coeficiente de absorção para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	111
Figura A. 5: Coeficiente de atenuação para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	112
Figura A. 6: Coeficiente de espalhamento para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	112
Figura A. 7: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	113
Figura A. 8: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	113
Figura A. 9: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	114
Figura A. 10: Irradiância descendente para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	116
Figura A. 11: Radiância ascendente para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	116
Figura A. 12: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	117
Figura A. 13: Coeficiente de absorção para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	117
Figura A. 14: Coeficiente de atenuação para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	118
Figura A. 15: Coeficiente de espalhamento para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	118
Figura A. 16: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	119
Figura A. 17: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	119
Figura A. 18: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	120
Figura A. 19: Irradiância Descendente para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	122
Figura A. 20: Radiância ascendente para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	122

Figura A. 21: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	123
Figura A. 22: Coeficiente de absorção para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	123
Figura A. 23: Coeficiente de atenuação para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	124
Figura A. 24: Coeficiente de espalhamento para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	124
Figura A. 25: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	125
Figura A. 26: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	125
Figura A. 27: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	126
Figura A. 28: Irradiância Descendente para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	128
Figura A. 29: Radiância ascendente para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	128
Figura A. 30: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	129
Figura A. 31: Coeficiente de absorção para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	129
Figura A. 32: Coeficiente de atenuação para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	130
Figura A. 33: Coeficiente de espalhamento para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	130
Figura A.34: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	131
Figura A. 35: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	131
Figura A. 36: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	132
Figura A. 37: Irradiância descendente para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	134
Figura A. 38: Radiância ascendente para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	134
Figura A. 39: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	135
Figura A. 40: Coeficiente de absorção para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	135

Figura A. 41: Coeficiente de atenuação para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	136
Figura A. 42: Coeficiente de espalhamento para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	136
Figura A. 43: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	137
Figura A. 44: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	137
Figura A. 45: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	138
Figura A. 46: Irradiância Descendente para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	140
Figura A. 47: Radiância Emergente para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	140
Figura A. 48: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	141
Figura A. 49: Coeficiente de absorção para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	141
Figura A. 50: Coeficiente de atenuação para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	142
Figura A. 51: Coeficiente de espalhamento para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	142
Figura A. 52: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	143
Figura A. 53: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	143
Figura A. 54: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	144
Figura A. 55: Irradiância descendente para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	146
Figura A. 56: Radiância ascendente para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	146
Figura A. 57: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	147
Figura A. 58: Coeficiente de absorção para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	147
Figura A. 59: Coeficiente de atenuação para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	148
Figura A. 60: Coeficiente de espalhamento para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	148

Figura A. 61: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro. ....	149
Figura A. 62: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	149
Figura A. 63: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.....	150
Figura B. 1: Modelos ópticos para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	151
Figura B. 2: Modelos ópticos para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	151
Figura B. 3: Modelos ópticos para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	152
Figura B. 4: Modelos ópticos para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	152
Figura B. 5: Modelos ópticos para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	153
Figura B. 6: Modelos ópticos para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	153
Figura B. 7: Modelos ópticos para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	154
Figura B. 8: Modelos ópticos para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	154
Figura B. 9: Modelos ópticos para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	155
Figura B. 10: Modelos ópticos para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro. ..	155





## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 6-1: Sumário estatístico dos dados limnológicos.....	62
Tabela 6-2: Características gerais do ponto amostral 03. ....	68
Tabela 6-3: Características gerais do ponto amostral 08. ....	81
Tabela 6-4: Características gerais do ponto amostral 26. ....	89
Tabela A-1: Características gerais do ponto amostral 05.....	109
Tabela A-2: Características gerais do ponto amostral 07.....	115
Tabela A-3: Características gerais do ponto amostral 09.....	121
Tabela A-4: Características gerais do ponto amostral 10.....	127
Tabela A-5: Características gerais do ponto amostral 11.....	133
Tabela A-6: Características gerais do ponto amostral 22.....	139
Tabela A-7: Características gerais do ponto amostral 29.....	145



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$	Ângulo zenital
$\phi$	Ângulo azimutal
$\theta_n$	Ângulo com o nadir
$\omega$	Ângulo sólido
$\lambda$	Comprimento de onda
$\varepsilon$	Energia
$\Phi$	Fluxo radiante
$\Phi_i$	Fluxo radiante incidente
$\Phi_c$	Fluxo radiante atenuado
$\Phi_t$	Fluxo radiante transmitido
$\Phi_a$	Fluxo radiante absorvido
$\Phi_b$	Fluxo radiante espalhado
$I$	Intensidade radiante
$L$	Radiância ( $mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ )
$L_u$	Radiância ascendente ( $mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ )
$E$	Irradiância ( $mW \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ )
$E_d$	Irradiância descendente ( $mW \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ )
$E_u$	Irradiância ascendente ( $mW \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ )
$FR$	Fator de Reflectância
$POI$	Propriedades Ópticas Inerentes
$A(\lambda)$	Absorbância espectral
$a(\lambda)$	Coeficiente de absorção espectral ( $m^{-1}$ )
$B(\lambda)$	Escaterância espectral
$b(\lambda)$	Coeficiente de espalhamento espectral ( $m^{-1}$ )
$b_w(\lambda)$	Coeficiente de espalhamento espectral da água pura ( $m^{-1}$ )
$b_b(\lambda)$	Coeficiente de retroespalhamento espectral ( $m^{-1}$ )
$b_f(\lambda)$	Coeficiente de espalhamento frontal espectral ( $m^{-1}$ )

$b_{bw}(\lambda)$	Coeficiente de retroespalhamento espectral da água pura ( $m^{-1}$ )
$b_{bf}(\lambda)$	Coeficiente de retroespalhamento espectral do fitoplâncton ( $m^{-1}$ )
$b_{bMS}(\lambda)$	Coeficiente de retroespalhamento espectral dos minerais em suspensão ( $m^{-1}$ )
$C(\lambda)$	Atenuação espectral
$c(\lambda)$	Coeficiente de atenuação espectral ( $m^{-1}$ )
$T(\lambda)$	Transmitância espectral
$\beta(\theta)$	Função de espalhamento volumétrico
$POA$	Propriedades Ópticas Aparentes
$z$	Profundidade
$R(z; \lambda)$	Razão de irradiância
$Q(z; \lambda; \theta; \phi)$	Fator Q ( $sr$ )
$R_{SR}(z; \lambda; \theta; \phi)$	Reflectância de Sensoriamento Remoto ( $sr^{-1}$ )
$K_d$	Coeficiente de atenuação difusa vertical ( $m^{-1}$ )
${}^w K_d$	Coeficiente de atenuação vertical ponderado ( $m^{-1}$ )
$\xi$	Profundidade óptica
$COA$	Componentes Ópticamente Ativos
$MOD$	Matéria Orgânica Dissolvida
$[chl]$	Concentração de clorofila-a ( $\mu g \cdot L^{-1}$ )
$[SM]$	Concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão (do inglês: <i>Suspended Minerals</i> - $mg \cdot L^{-1}$ )
$Chl-a$	Clorofila-a
$MST$	Material em Suspensão Total
$CDT$	Carbono Dissolvido Total
$MSI$	Material em Suspensão Inorgânico
$MSO$	Material em Suspensão Orgânico
$CID$	Carbono Inorgânico Dissolvido
$COD$	Carbono Orgânico Dissolvido
$Feo$	Feofitina

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>5</b>
3.1 Óptica hidrológica.....	5
3.2 Propriedades que definem a geometria do campo de luz .....	5
3.2.1 Medidas de energia radiante .....	7
3.3 Propriedades ópticas da água.....	9
3.3.1 Propriedades Ópticas Inerentes (POI).....	9
3.3.2 Propriedades Ópticas Aparentes (POA).....	13
3.3.3 Profundidade óptica .....	18
3.4 Componentes Opticamente Ativos (COA).....	19
3.4.1 Água pura.....	20
3.4.2 Material orgânico dissolvido .....	21
3.4.3 Fitoplâncton.....	22
3.4.4 Sedimentos em suspensão .....	23
3.5 Tipos de água.....	23
3.6 Sensoriamento remoto de sistemas aquáticos.....	24
3.6.1 Relação entre a reflectância e as POI.....	25
<b>4. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>33</b>
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
5.1 Materiais.....	37
5.1.1 Equipamentos .....	37

5.1.2	Aplicativos .....	47
5.2	Métodos.....	47
5.2.1	Amostragem em campo .....	48
5.2.2	Primeira campanha de campo.....	49
5.2.3	Segunda campanha de campo.....	50
5.2.4	Modelos ópticos .....	58
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
6.1	Caracterização bio-óptica.....	61
6.1.1	Comparação entre campanhas .....	61
6.1.2	Análise pontual.....	67
6.2	Modelos ópticos .....	95
6.2.1	Comparação entre campanhas .....	95
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
	<b>RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>151</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A água no ambiente natural é uma mistura de materiais dissolvidos e suspensos em resposta às características de uso e cobertura do entorno e também às características geológicas e geomorfológicas da bacia de drenagem a que pertence (AHEARN et al., 2005). Alguns desses materiais possuem propriedades ópticas intrínsecas, ou seja, tem a capacidade de interagir com a luz em função de seu tipo e concentração, esses são os componentes opticamente ativos (COA). A presença, concentração e distribuição desses componentes na coluna d'água são os fatores responsáveis pelas modificações em sua cor, pois eles absorvem e espalham seletivamente a luz incidente (KAMPEL e NOVO, 2008).

O sensoriamento remoto da cor da água baseia-se na análise do impacto da composição da coluna d'água sobre as propriedades ópticas do meio aquático. A reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{SR}$ ) tem sido extensivamente usada para estimar a concentração dos COA na coluna d'água a partir de dados de sensores remotos. Para relacionar essa quantidade radiométrica à composição da água podem ser usados modelos empíricos (DALLI'OLMO et al., 2003; MOSES et al., 2009), que são aqueles que relacionam a  $R_{SR}$  à composição do meio por relações estatísticas; ou modelos analíticos (GORDON, et al., 1988; JEROME et al., 1996), que são modelos de resolução da equação de transferência radiativa (ETR), a equação que descreve o processo de propagação da radiação dentro de um corpo d'água.

Os modelos empíricos tem aplicação limitada ao ambiente específico onde foi criado para aquela condição ambiental encontrada em campo, por isso tem sua reprodutibilidade restrita. Já os modelos analíticos dependem de medidas das propriedades ópticas inerentes (POI) para a sua resolução. Essas propriedades são as características ópticas intrínsecas do ambiente em análise, dependendo unicamente do tipo e concentração dos COA no meio aquático.

Existem poucos dados disponíveis sobre as POI em águas do Caso 2, que são as águas que não possuem um componente dominante único sobre sua cor. Isso é verdade até mesmo para águas do Caso 1, aquelas em que o componente dominante sobre a cor da água é o fitoplâncton e os outros covariam com este. Esse fato decorre de que só a partir da década de 1990 começaram a ser desenvolvidos equipamentos para medir essas propriedades. Assim, a alternativa para a obtenção das POI foi o desenvolvimento de modelos que relacionam a  $R_{SR}$  a essas propriedades do meio.

Diante dessa lacuna nos dados ópticos de águas do Caso 2 este estudo visou ampliar o conhecimento sobre as propriedades ópticas da água e testar a aplicação de modelos de estimativa da  $R_{SR}$  em um ambiente de águas complexas do Caso 2. Formulou-se, então, a seguinte hipótese: O modelo de Gordon et al. (1988) desenvolvido para simular a Reflectância de Sensoriamento Remoto em águas do Caso 1 é aplicável a águas complexas do Caso 2?



## **2. OBJETIVO**

O objetivo geral desta pesquisa foi testar a aplicabilidade do modelo do Gordon et al. (1988) em águas do Caso 2. Para isso, foram definidos como objetivos específicos:

- Caracterizar as propriedades ópticas de um ambiente com águas complexas do Caso 2;
- Avaliar a variabilidade dessas propriedades em função das condições ambientais do meio;
- Testar modelos explanatórios da interação da luz com o meio aquático.



### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Óptica hidrológica**

Óptica é a parte da física que estuda a luz (radiação eletromagnética). Como o comportamento da luz é fortemente afetado pela natureza do meio, existem diferentes ramos da óptica para lidar com os diferentes sistemas físicos. Assim, a óptica hidrológica visa descrever e explicar o comportamento da luz no meio aquático (KIRK, 2011).

#### **3.2 Propriedades que definem a geometria do campo de luz**

Para entender as mudanças no campo de luz nos sistemas aquáticos com a profundidade, inicialmente é necessário definir quais são os atributos essenciais de um campo de luz nos quais tais mudanças devam ser previstas.

A direção de um feixe em um campo de luz deve ser expressa em termos de ângulo zenital ( $\theta$ ), ângulo azimutal ( $\phi$ ), e ângulo com o nadir ( $\theta_n$ ). O ângulo zenital é o ângulo formado por um feixe de luz e o zênite, ou seja, o ângulo entre o feixe e a vertical ascendente, perpendicular à superfície (KIRK, 2011). O ângulo azimutal é o ângulo formado pelo plano vertical que incorpora o feixe de luz e algum outro plano vertical específico, tal como o do Sol. Para a luz que emerge da coluna d'água é conveniente diferenciar o zênite do nadir; sendo o ângulo com o nadir análogo ao ângulo zenital, mas formado entre o feixe e a vertical descendente.

Para melhor entendimento dessas relações é conveniente analisar a Figura 3.1:

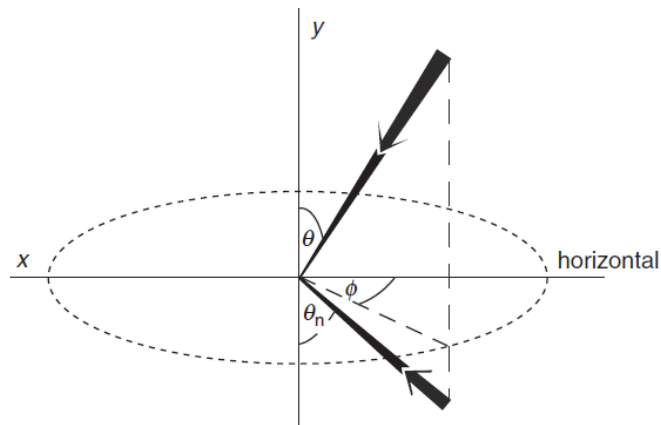


Figura 3.1: Ângulos que definem a direção no campo de luz. Onde:  $\theta$  é o ângulo zenital,  $\phi$  é o ângulo azimutal, e  $\theta_n$  é o ângulo com o nadir.

Fonte: Kirk (2011).

Outra definição importante em óptica hidrológica é a do ângulo sólido, que estende o conceito de ângulo para três dimensões (Figura 3.2). Um ângulo sólido é representado pela divisão do elemento de área esférico, pelo quadrado do raio da esfera (PALMER e GRANT, 2009).

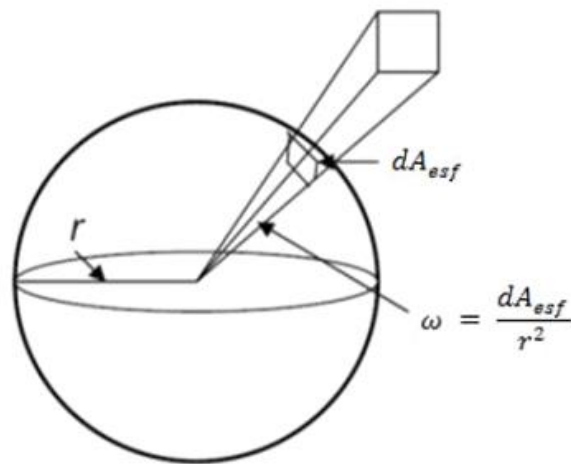


Figura 3.2: Representação esquemática do ângulo sólido. Onde:  $\omega$  é o ângulo sólido,  $dA_{esf}$  é o elemento de área esférico, e  $r$  é o raio da esfera.

Fonte: Adaptado de Palmer e Grant (2009).

Assim, um ângulo sólido é equacionado na forma da Equação 3.1 e tem como unidade de medida o esferorradiano (sr).

$$\varpi = \frac{dA_{esf}}{r^2}$$

Equação 3.1

onde:  $\varpi$  é o ângulo sólido,  $dA_{esf}$  é o elemento de área esférico, e  $r$  é o raio da esfera.

### 3.2.1 Medidas de energia radiante

A energia eletromagnética é transferida em unidades denominadas fótons. Segundo Kirk (2011), apesar dessa natureza particulada, a radiação eletromagnética se comporta, em alguns processos, como se possuísse caráter ondulatório. Por isso, cada fóton tem um comprimento de onda e uma frequência a eles associada segundo a Equação 3.2.

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Equação 3.2

onde:  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $c$  é a velocidade da luz, e  $\nu$  é a frequência.

Como  $c$  é constante em um dado meio, quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência, sendo estas grandezas inversamente proporcionais.

A energia em um fóton varia com a sua frequência e, com isso, inversamente com o seu comprimento de onda seguindo a relação expressa na Equação 3.3:

$$\varepsilon = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Equação 3.3

onde  $\varepsilon$  é a energia e  $h$  é a constante de Planck, de valor  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s.

Para um feixe de luz composto por uma ampla faixa de comprimentos de onda a energia total radiante ( $Q$ ) é dada pela soma das energias de todos os fótons, ou seja, das  $\varepsilon_i$  em todos os comprimentos de onda de interesse. A unidade de medida dessa grandeza é o joule.

Quando a energia total é computada por tempo tem-se o fluxo radiante, que segundo Jerlov (1976), é a taxa de energia radiante no tempo, para a qual Kirk (2011) utiliza o símbolo  $\Phi$ . Essa medida é dada em watts (W).

A intensidade radiante é o fluxo radiante emitido por uma fonte em um cone infinitesimal em uma dada direção, dividido pelo ângulo sólido definido por esse cone (JERLOV, 1976). Kirk (2011) utiliza o símbolo  $I$  para denotar essa grandeza, que é dada em watts por esferorradiano ( $W.sr^{-1}$ )

Definidos estes conceitos básicos, pode-se agora conceituar as duas grandezas de maior interesse em óptica hidrológica: a Radiância e a Irradiância.

A radiância é definida por Palmer e Grant (2009) como o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido incidente em uma determinada unidade de área. Seu símbolo é  $L$ , sua dimensão é dada em  $W.m^{-2}.sr^{-1}$  e é descrita pela Equação 3.4.

$$L(\theta, \phi) = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\omega} \quad \text{Equação 3.4}$$

onde:  $L$  é a radiância,  $\Phi$  é o fluxo radiante,  $A$  é o elemento de área,  $\theta$  é o ângulo zenital e  $\omega$  é o ângulo sólido.

Se a radiância for integrada em todo o hemisfério tem-se a irradiância (Equação 3.5), que é definida por Jerlov (1976) e Kirk (2011) como o fluxo radiante incidente em um elemento infinitesimal de superfície contendo o ponto em análise dividido pela área do elemento.

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \int_{2\pi} L(\theta, \phi) \cdot \cos\theta \cdot d\omega \quad \text{Equação 3.5}$$

onde:  $E$  é a irradiância,  $\Phi$  é o fluxo radiante,  $A$  é o elemento de área,  $L$  é a radiância,  $\theta$  é o ângulo zenital,  $\phi$  é o ângulo azimutal e  $\omega$  é o ângulo sólido.

A unidade de medida da irradiância é o  $W.m^{-2}$ . A irradiância representa a potência incidente em uma determinada superfície. O exemplo mais comum de irradiância é a constante solar. A constante solar é a potência por unidade de área medida no topo da atmosfera. Seu valor numérico é estimado em  $1368 W.m^{-2}$  (PALMER e GRANT, 2009).

Além disso, em trabalhos de campo é conveniente aferir o fator de reflectância do alvo em análise. O termo Fator de Reflectância (FR) é definido como sendo a razão entre o fluxo radiante refletido por um alvo e aquele que seria refletido na mesma geometria de aquisição e iluminação por uma placa ideal, lambertiana, padrão (NICODEMUS et al., 1977). O FR é descrito na Equação 3.6.

$$FR = \frac{L_a}{L_p} \cdot K \quad \text{Equação 3.6}$$

onde:  $FR$  é o fator de reflectância,  $L_a$  é a radiância do alvo,  $L_p$  é a radiância da placa, e  $K$  é o fator de correção da placa.

### 3.3 Propriedades ópticas da água

As propriedades ópticas da água podem ser separadas em dois grandes grupos: (1) aquelas propriedades que dependem unicamente do tipo de substância presente na água e de sua concentração; e (2) aquelas que além de serem influenciadas pela composição da água também dependem da geometria do campo de luz do ambiente no momento da obtenção das medidas. Esses grandes grupos encontram-se descritos nas seções que se seguem.

#### 3.3.1 Propriedades Ópticas Inerentes (POI)

As propriedades ópticas inerentes (POIs) são aquelas propriedades que dependem apenas do meio, ou seja, são independentes do campo de luz, sendo definidas apenas pelo tipo e concentração das substâncias na água. As

POIs normalmente empregadas na óptica hidrológica são os coeficientes de absorção e de espalhamento espectral, e a função de espalhamento volumétrico (MOBLEY, 1994).

### 3.3.1.1 Absorção

A absorção resulta da interação do feixe de luz com a matéria de tal modo que parte dele seja utilizada para outros fins (como a fotossíntese, por exemplo) e deixe de fazer parte do feixe original. Sendo que a absorbância ( $A$  - Equação 3.7) é a taxa do fluxo radiante perdida devido à absorção em relação ao fluxo incidente, o coeficiente de absorção ( $a$  - Equação 3.8) é então definido como a absorbância interna de uma camada infinitesimal de um meio normal ao feixe de luz, dividida pela espessura da camada (MOBLEY, 1994).

$$A(\lambda) = \frac{\Phi_a(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad \text{Equação 3.7}$$

onde:  $A$  é a absorbância;  $\Phi_a$  é o fluxo absorvido; e  $\Phi_i$  é o fluxo incidente. Por ser uma fração do fluxo incidente, a absorbância é uma propriedade adimensional.

$$a(\lambda) = \frac{\Delta A(\lambda)}{\Delta r} \quad \text{Equação 3.8}$$

onde:  $a$  é o coeficiente de absorção;  $\Delta A$  é a variação na absorbância interna de uma camada de água de espessura  $\Delta r$ . A unidade do coeficiente de absorção é  $\text{m}^{-1}$ .

### 3.3.1.2 Espalhamento

O espalhamento resulta da interação do feixe de luz que faz com que uma parte dele se desvie da sua direção original e/ou mude de comprimento de onda. Kirk (2011) define o que se chama didaticamente de escaterância ( $B$  - Equação 3.9) como a taxa do fluxo radiante perdida devido ao espalhamento



do fluxo incidente. Assim, analogamente ao coeficiente de absorção, o coeficiente de espalhamento ( $b$  - Equação 3.10) é definido como a escaterância interna de uma camada infinitesimal de um meio normal ao feixe de luz, dividida pela espessura da camada (MOBLEY, 1994).

$$B(\lambda) = \frac{\Phi_b(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad \text{Equação 3.9}$$

onde:  $B$  é a escaterância;  $\Phi_b$  é o fluxo espalhado; e  $\Phi_i$  é o fluxo incidente. Por ser uma fração do fluxo incidente, a escaterância é uma propriedade adimensional.

$$b(\lambda) = \frac{\Delta E(\lambda)}{\Delta r} \quad \text{Equação 3.10}$$

onde:  $b$  é o coeficiente de espalhamento;  $\Delta E$  é a variação na escaterância interna de uma camada de água de espessura  $\Delta r$ . A unidade do coeficiente de espalhamento é  $\text{m}^{-1}$ .

É útil diferenciar o espalhamento frontal daquele que se dá na direção oposta à de incidência, ou seja, de volta para o hemisfério de onde o feixe saiu (ZANEVELD et al., 2006). Tradicionalmente o espalhamento para frente é denominado de espalhamento frontal (*forwardscattering* -  $b_f$ ) e o para trás de retroespalhamento (*backscattering* -  $b_b$ ). Essa diferenciação é conveniente, pois a parcela do espalhamento de maior interesse para o sensoriamento remoto é o retroespalhamento, visto que é esse dado que será registrado pelos sensores.

### 3.3.1.3 Atenuação

A atenuação (Equação 3.11) é a razão do fluxo radiante perdida por absorção e espalhamento do fluxo incidente (MOBLEY, 1994). Em outras palavras, a atenuação é o fluxo incidente decrescido do fluxo transmitido (aquele fluxo que não interagiu com o meio).

$$C(\lambda) = \frac{\Phi_c(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} = \Phi_t(\lambda) - \Phi_r(\lambda) \quad \text{Equação 3.11}$$

onde:  $C$  é a atenuação;  $\Phi_c$  é o fluxo atenuado;  $\Phi_i$  é o fluxo incidente;  $\Phi_t$  é o fluxo transmitido. Por ser uma fração do fluxo incidente, a atenuação é uma propriedade adimensional.

Definido o que é a atenuação, o coeficiente de atenuação total ( $c$  - Equação 3.12) então, é a atenuação interna de uma camada infinitesimal do meio perpendicular ao feixe, dividida pela espessura da camada (MOBLEY, 1994).

$$c(\lambda) = \frac{\Delta C(\lambda)}{\Delta r} \quad \text{Equação 3.12}$$

onde:  $c$  é o coeficiente de atenuação;  $\Delta C$  é a variação na atenuação interna de uma camada de água de espessura  $\Delta r$ . A unidade do coeficiente de atenuação é  $m^{-1}$ .

Esse coeficiente é a soma do espalhamento e da absorção (Equação 3.13), ou seja, é o mesmo que o total decrescido do valor de tudo que é transmitido do feixe.

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad \text{Equação 3.13}$$

onde:  $c$  é o coeficiente de atenuação;  $a$  é o coeficiente de absorção; e  $b$  é o coeficiente de espalhamento.

#### 3.3.1.4 Função de espalhamento volumétrico

Definida por Jerlov (1976), a função de espalhamento volumétrico (Equação 3.14) é a intensidade radiante a partir de um elemento de volume, em uma dada direção, iluminada por um feixe de luz, por unidade de irradiância na seção transversal do volume e por unidade de volume.

De um modo mais tangível, Kirk (2011) define esta propriedade como a distribuição angular do fluxo espalhado. Ele explica que a forma como o espalhamento afeta a penetração da luz no meio não depende somente do coeficiente de espalhamento, mas também da distribuição angular do fluxo espalhado e seu formato característico. Essas características são ditadas pela função de espalhamento volumétrico, a qual possui dimensão de  $\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ .

$$\beta(\theta) = \frac{dI(\theta)}{E \cdot dV} \quad \text{Equação 3.14}$$

onde:  $\beta$  é a função de espalhamento volumétrico,  $I$  é a intensidade radiante,  $E$  é a irradiância, e  $V$  é o elemento de volume.

### 3.3.2 Propriedades Ópticas Aparentes (POA)

As propriedades ópticas aparentes (POAs) dependem tanto do meio com seus componentes e concentrações quanto da estrutura direcional do campo de luz ambiente (SATHYENDRANATH, et al., 2000). Estas propriedades são expressas em razões para que o efeito de variações externas do ambiente seja reduzido, implicando que mudanças significativas nessas propriedades reflitam em mudanças nas propriedades ópticas (MOBLEY, 1994).

Diferentemente das POI, as POA não podem ser medidas em laboratório em amostras de água, pois essas propriedades dependem da distribuição de radiância encontrada no corpo d'água.

Algumas POAs de interesse para esta pesquisa estão descritas nas seções que se seguem.

#### 3.3.2.1 Razão de irradiância

Uma propriedade óptica aparente bastante utilizada é a razão de irradiância (do inglês: *irradiance reflectance* - Equação 3.15). Esta propriedade é definida por

Mobley (1994) e Kirk (2011) como a razão entre a irradiância ascendente pela irradiância descendente.

$$R(z; \lambda) = \frac{E_u(z; \lambda)}{E_d(z; \lambda)} \quad \text{Equação 3.15}$$

onde:  $R$  é a razão de irradiância,  $E_u$  é a irradiância ascendente (do inglês: *upwelling irradiance*) na coluna d'água,  $E_d$  é a irradiância descendente (do inglês: *downwelling irradiance*) na coluna d'água,  $z$  é a profundidade e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

Gordon et al. (1988) e Mobley (1994) aplicam essa propriedade na subsuperfície, ou seja, quando  $z$  é igual a 0 ou, com maior rigor,  $z$  seria igual a 0- para indicar que esse dado é tomado logo abaixo da interface água/ar, e não acima dela. Esta propriedade pode ser calculada para qualquer profundidade, mas isso deve ser devidamente explicitado, caso contrário o que se espera é que o dado seja de subsuperfície.

### 3.3.2.2 Fator Q

O fator Q (Equação 3.16) é definido por Gordon et al. (1988) e Kirk (2011) como a razão da irradiância ascendente pela radiância ascendente, ambas medidas com os sensores posicionados perpendicularmente à superfície da água. Q seria igual a  $\pi$  para uma distribuição de radiância totalmente difusa, de acordo com análises empíricas, seu valor pode variar de 4 a 5.

$$Q(z; \lambda; \theta; \phi) = \frac{E_u(z; \lambda)}{L_u(z; \lambda; \theta; \phi)} \quad \text{Equação 3.16}$$

onde:  $Q$  é o fator,  $E_u$  é a irradiância emergente na coluna d'água,  $L_u$  é a radiância emergente na coluna d'água.  $z$  é a profundidade,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $\theta$  é o ângulo zenital e  $\phi$  é o ângulo azimutal. Este dado é expresso com dimensão de sr.

### 3.3.2.3 Reflectância de Sensoriamento Remoto (RSR)

Analogamente à razão de irradiância, Kirk (2011) define a radiância refletida como sendo a razão entre a radiância ascendente e a irradiância descendente, também conhecida como reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{sr}$  - Equação 3.17). Ela é uma medida do quanto da luz que atinge a superfície da água retorna para a atmosfera permitindo a sua detecção por um sensor.

Mobley (1994) aplica esse parâmetro a medidas realizadas logo acima da superfície da água, ou seja, no ar ( $z=0+$ ) sendo o dado expresso com dimensão de  $sr^{-1}$ .

$$R_{sr}(z; \lambda; \theta; \phi) = \frac{L_u(z; \lambda; \theta; \phi)}{E_d(z; \lambda; \theta; \phi)} \quad \text{Equação 3.17}$$

onde:  $R_{sr}$  é a reflectância de sensoriamento remoto,  $L_u$  é a radiância ascendente na coluna d'água,  $E_d$  é a irradiância descendente na coluna d'água,  $z$  é a profundidade,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $\theta$  é o ângulo zenital e  $\phi$  é o ângulo azimutal.

Kirk (2011) explica que a parte do fluxo emergente logo abaixo da superfície da água é de particular interesse para o sensoriamento remoto, por isso esse autor define a reflectância de sensoriamento remoto como uma propriedade óptica medida logo abaixo da superfície da água.

### 3.3.2.4 Coeficiente de atenuação difusa vertical

No meio aquático os parâmetros de fluxo radiante por unidade de área mudam com a profundidade, por isso é útil ter uma medida da taxa de mudança dessas propriedades com a profundidade. Esses parâmetros possuem um decaimento exponencial em profundidade, por isso é conveniente aplicar o logaritmo a esses parâmetros a fim de obter sua taxa de mudança. Essa taxa será aproximadamente igual em todas as profundidades (KIRK, 2011).

Um exemplo de propriedade cujo decaimento em profundidade é de interesse é a irradiância descendente (Equação 3.18). Dessa forma Kirk (2011) define o coeficiente de atenuação vertical para a irradiância descendente ( $K_d$ ), como descrito na Equação 3.19.

$$E_d(z) = E_d(-0) \cdot e^{-K_d \cdot z} \quad \text{Equação 3.18}$$

$$\ln E_d(z) = -(K_d \cdot z) + \ln E_d(-0)$$

$$K_d = \frac{1}{z} \cdot (\ln E_d(-0) - \ln E_d(z))$$

$$K_d = \frac{1}{z} \cdot \ln \frac{E_d(-0)}{E_d(z)} \quad \text{Equação 3.19}$$

onde:  $K_d$  é o coeficiente de atenuação vertical ou difusa,  $E_d(-0)$  é a irradiância descendente na coluna d'água logo abaixo da superfície da água e  $E_d(z)$  é a irradiância descendente na coluna d'água na profundidade de interesse.

Kirk (2011) sugeriu que o  $K_d$  é o melhor parâmetro para caracterizar um corpo d'água com relação à disponibilidade de energia radiante fotossinteticamente ativa. O autor ainda sugere que este coeficiente não é exatamente constante com a profundidade mesmo em um corpo d'água homogêneo. Entretanto, a variação não é alta e o conhecimento do valor médio do  $K_d$  até uma profundidade onde a irradiância disponível seja uma fração ínfima daquela de superfície, é bastante útil para definir os limites da zona eufótica, ou seja, até que ponto da coluna d'água a fotossíntese é possível.

Para Mobley (1994) esse coeficiente é denominado coeficiente de atenuação difusa e não coeficiente de atenuação vertical. Entretanto a sua representação matemática e significado são os mesmos.

Nesta pesquisa, convencionou-se que o nome deste coeficiente será coeficiente de atenuação difusa vertical. Difusa, pois é uma medida do decaimento da irradiância que é um parâmetro hemisférico; e vertical, pois é medido da superfície da água em direção ao fundo, no plano perpendicular a superfície.

Mobley (1994) ainda ressalta que, para que o coeficiente seja aproximadamente constante com a profundidade a medida deve ser realizada suficientemente abaixo da interface ar-água e suficientemente acima do fundo do corpo d'água para garantir a ausência de efeitos do contorno tais como ondulações na superfície da água e resposta do fundo.

### 3.3.2.5 Coeficiente de atenuação difusa vertical ponderado

Como dito anteriormente, para propósitos oceanográficos e limnológicos é desejável que se tenha uma estimativa do valor médio do  $K_d$  em um intervalo de profundidade, em geral na zona eufótica, onde a intensidade da luz é suficiente para a fotossíntese. Entretanto, essa escolha do intervalo de interesse é arbitrária, portanto uma abordagem alternativa consiste em utilizar os valores de irradiância para ponderar a estimativa do  $K_d$ .

Segundo Kirk (2011) o coeficiente ponderado de atenuação vertical da irradiância descendente,  ${}^wK_d$ , é o produto de  $K_d(Z)$  e  $E_d(Z)$  integrado em todas as profundidades, dividido pela integral de  $E_d(z)$  em todas as profundidades como descrito na Equação 3.20.

$${}^wK_d = \frac{\int_0^{\infty} K_d(z) \cdot E_d(z) \cdot dz}{\int_0^{\infty} E_d(z) \cdot dz} \quad \text{Equação 3.20}$$

onde:  ${}^wK_d$  é o coeficiente de atenuação vertical ponderado,  $E_d(z)$  é a irradiância descendente na coluna d'água na profundidade ( $z$ ) de interesse.

O significado dessa equação é que em qualquer profundidade e valor de  ${}^w K_d$  é balanceado pelo valor apropriado  $E_d(z)$  naquela profundidade (Equação 3.21). Em termos práticos, para determinar o  ${}^w K_d$  utiliza-se o dado de  $E_d(z)$  para uma série de profundidades em intervalos iguais até uma profundidade abaixo da qual a luz restante é uma porção trivial do total na coluna d'água.

$${}^w K_d = \frac{\sum_{i=1}^N K_d(z_i; z_{i+2}) \cdot E_d(z_{i+1})}{\sum_{i=1}^N E_d(z_{i+1})} \quad \text{Equação 3.21}$$

onde:  $E_d(z)$  é a irradiância descendente na coluna d'água na profundidade ( $z$ ) de interesse,  $z_{i+1}$  é a profundidade de interesse acrescida de 1m,  $z_{i+2}$  é a profundidade de interesse acrescida de 2m e o termo  $K_d(z_i; z_{i+2})$  é um termo utilizado para suavizar o perfil espectral de  $K_d$ , sendo obtido pela Equação 3.22.

$$K_d(z_i; z_{i+2}) = \frac{1}{2\Delta z} \ln \frac{E_d(z_i)}{E_d(z_{i+2})} \quad \text{Equação 3.22}$$

onde  $\Delta z$  é a variação de profundidade em metros.

### 3.3.3 Profundidade óptica

Como enunciado, a irradiância descendente diminui em profundidade de modo aproximadamente exponencial como mostra a Equação 3.18. Com isso, Kirk (2011) define a profundidade óptica como o módulo do expoente de decaimento exponencial como descrito na Equação 2.23.

$$\xi = K_d \cdot z \quad \text{Equação 3.23}$$

onde:  $\xi$  é a profundidade óptica,  $K_d$  é o coeficiente de atenuação vertical ou difusa e  $z$  é a profundidade.



Uma profundidade óptica corresponderá a diferentes profundidades físicas em águas com diferentes propriedades ópticas, mas com a mesma diminuição global da irradiância descendente.

Kirk (2011) explica que profundidades ópticas de interesse para a produtividade primária são aquelas que correspondem à atenuação da irradiância descendente a 10% e a 1% dos valores de subsuperfície, o que corresponderia a  $\xi=2,3$  e  $\xi=4,6$ ; respectivamente. Essas profundidades ópticas correspondem ao ponto médio e ao ponto limite da zona eufótica, dentro da qual a fotossíntese ocorre.

### **3.4 Componentes Opticamente Ativos (COA)**

A água nos sistemas naturais é composta pela soma de substâncias diferentes da água pura, reflexo das influências do entorno do curso d'água, tais como nutrientes, material em suspensão, material dissolvido, algas, etc., dentre as quais algumas têm a capacidade de interagir com a radiação eletromagnética. Por esse motivo, corpos d'água com diferentes substâncias e concentrações apresentarão diferenças significativas em sua resposta espectral.

Os componentes opticamente ativos são os que interagem com a luz e podem, então, ser monitorados por sensoriamento remoto. As feições de absorção destes componentes irão definir a forma final da curva de reflectância da água, enquanto que suas concentrações serão responsáveis pela magnitude das feições e pela magnitude da energia refletida na subsuperfície (KIRK, 2011). Por esse motivo, é importante conhecer o comportamento espectral (Figura 3.3) individual desses componentes para poder interpretar a energia emergente da coluna d'água.

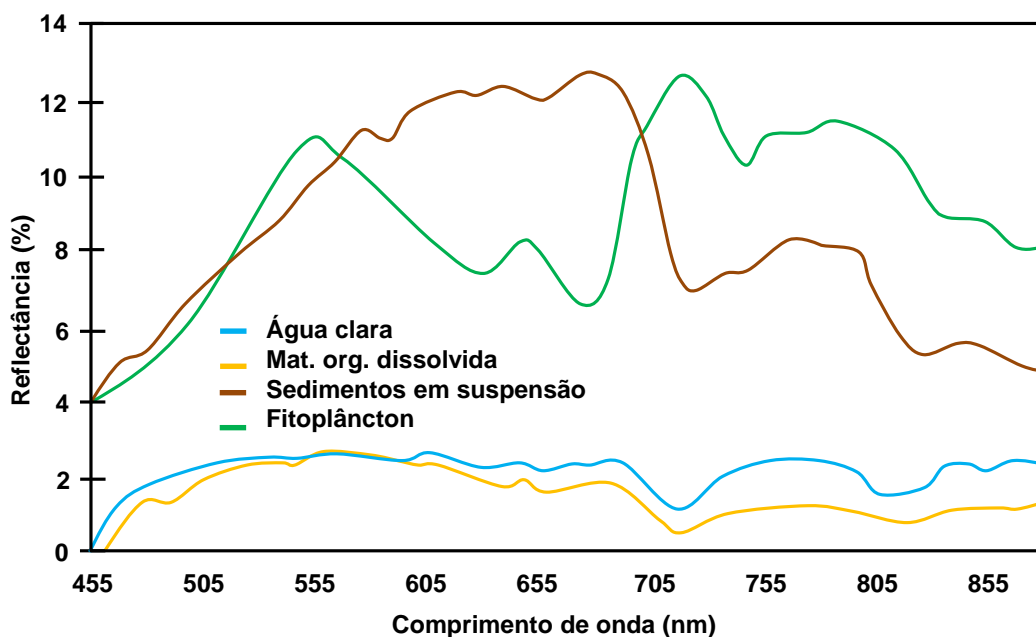


Figura 3.3: Comportamento espectral dos COA.  
 Fonte: Adaptado de Rudorff et al. (2006).

### 3.4.1 Água pura

A água pura é um termo usado para designar um meio hipotético contendo apenas moléculas de água e sais dissolvidos (SATHYENDRANATH, et al., 2000). As características de absorção da água pura encontram-se na Figura 3.4 que mostra o coeficiente de absorção espectral da água pura medido por Pope e Fry (1997). Em resposta ao coeficiente de absorção, o coeficiente de espalhamento da água pura é máximo na região do azul, e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho (LOBO, 2009).

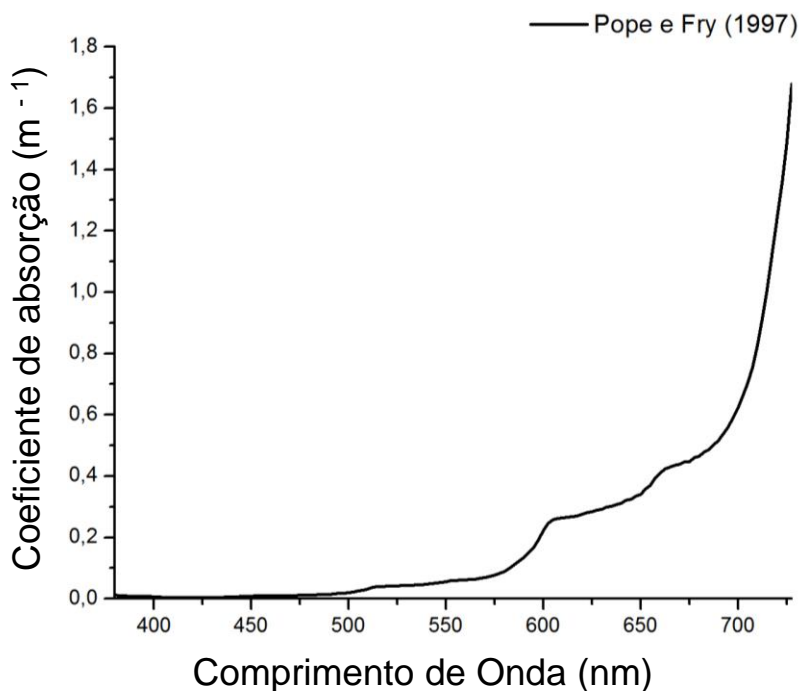


Figura 3.4: Coeficiente de absorção espectral da água pura.  
Fonte: Pope e Fry (1997)

### 3.4.2 Material orgânico dissolvido

Os compostos orgânicos dissolvidos contidos na água são produzidos pela decomposição de material vegetal e consistem, principalmente, de ácidos húmicos e fúlvicos, resultados da atividade fotossintética ou de entradas diretas de material terrestre (MANTOVANI e NOVO, 1996; SATHYENDRANATH, et al., 2000).

A alteração da cor da água pela presença dessas substâncias deve-se à sua forte ação absorvedora da luz nos menores comprimentos de onda do visível. Estes compostos apresentam uma curva de absorção com altos valores no ultravioleta, decrescendo quase exponencialmente até o verde, com valores muito baixos no vermelho (MANTOVANI e NOVO, 1996). Este fato é notado em termos visuais, pois corpos d'água com elevada concentração de matéria orgânica dissolvida apresentam coloração mais escura e amarelada (KUTSER et al., 2005). Mobley (1994) explica que estes componentes são geralmente marrons e, com o aumento de sua concentração na água, esta se torna

amarelada, por isso são denominadas substâncias amarelas ou matéria orgânica colorida dissolvida (CDOM- do inglês: *Coloured Dissolved Organic Matter*).

Apesar de alguns autores classificarem esse componente como um absorvedor verdadeiro (do inglês: *true absorber*), o que significa dizer que a sua contribuição ao espalhamento é negligenciável (GALLAGHER, 2004); já foi evidenciado por Mantovani (1993) e Mobley (1994) que, devido às suas características coloidais, a matéria orgânica dissolvida possui tamanho suficiente para interagir com a radiação eletromagnética e provocar espalhamento desta, em especial nos comprimentos de onda mais longos da faixa do visível e início do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, que é onde a absorção por este COA é menor (MANTOVANI, 1993).

### **3.4.3 Fitoplâncton**

Este componente inclui não somente o fitoplâncton, mas também outros microrganismos, entretanto é conhecido unicamente por fitoplâncton devido a sua maior influência nas propriedades ópticas. Eles são a base da cadeia alimentar aquática e um importante componente do ciclo global do carbono (SATHYENDRANATH, et al., 2000), pois absorvem a radiação eletromagnética para a fixação do carbono e produção de oxigênio, através da fotossíntese. Este processo ocorre devido à presença dos pigmentos fotossintéticos, que são moléculas capazes de captar a energia eletromagnética (LONDE, 2008) e convertê-la em energia química.

De acordo com Novo (2001), com o aumento da concentração desse componente, o máximo de reflectância da água passa gradativamente do azul para o verde, ao mesmo tempo em que começa a haver um aumento da energia refletida na região em torno de 680nm, região de emissão associada à fluorescência da clorofila-a, principal pigmento fitoplanctônico.

Este pigmento não é o único existente, porém é o mais abundante. A clorofila-a apresenta dois picos de absorção da luz: um no azul (em 433 nm, denominado "Soret") e outro no vermelho (em 686 nm, denominado pico "alpha") (KIRK, 1993; RICHARDSON, 1996; LONDE, 2008). Seu espalhamento é dominante no verde por volta de 550nm (MOBLEY, 1994) com um pico de reflectância em torno de 715 nm, associado ao alto espalhamento pelas células fitoplanctônicas na água (FERREIRA, 2012).

#### **3.4.4 Sedimentos em suspensão**

As concentrações de material em suspensão podem ser bastante altas em águas costeiras e interiores. Estudos conduzidos por Mobley (1994) demonstraram que a fração inorgânica do material particulado é a maior responsável pelo aumento da reflectância na água devido ao seu maior índice de refração.

A origem do material particulado inorgânico em suspensão está associada a minerais provenientes de rochas ou solos, que são carregados para os corpos d'água por ação do vento ou da chuva, à re-suspensão ou erosão do fundo e a detritos inorgânicos como de conchas carbonáticas de moluscos e carapaças silicosas de certas algas planctônicas (SATHYENDRANATH, et al., 2000).

Novo (2001) explica que uma maior concentração de sedimentos em suspensão leva ao deslocamento da curva de reflectância da água em direção a comprimentos de onda mais longos do infravermelho. Na Figura 5 tem-se um exemplo da curva espectral da reflectância de sedimentos em suspensão na água (curva marrom).

#### **3.5 Tipos de água**

Morel e Prieur (1977) introduziram a classificação das águas em águas do Caso 1 ou águas do Caso 2. Sathyendranath (2000) define que águas do Caso 1 são aquelas cujo principal componente responsável por sua cor é o fitoplâncton. Isso não significa que os outros componentes não existam, mas

eles estão em quantidades diminutas quando em comparação com a concentração de fitoplâncton e, além disso, sua presença e quantidade covariam com o fitoplâncton.

As águas do Caso 2, em contrapartida, são aquelas cuja cor não é influenciada unicamente pelo fitoplâncton, mas também por outros componentes que variam independentemente deste (SATHYENDRANATH, et al., 2000).

### **3.6 Sensoriamento remoto de sistemas aquáticos**

O sensoriamento remoto quando aplicado aos sistemas aquáticos visa à compreensão do processo de interação entre luz e o meio. A água nos sistemas naturais é composta por diversos componentes. Desses componentes quatro são passíveis de serem estudados por sensoriamento remoto: a água pura, o fitoplâncton (representado por seus pigmentos fotossintetizantes), o material dissolvido e o material em suspensão.

O comportamento espectral desses componentes já foi bastante estudado, por isso analisar espectros emergentes da coluna d'água nos auxilia na compreensão qualitativa e quantitativa dos componentes presentes no sistema. Isso significa dizer que, a análise dos espectros de radiação eletromagnética emergentes da água nos permite não apenas saber quais componentes estão presente na água, mas também em qual concentração.

Por isso o sensoriamento remoto é uma ferramenta eficaz para o monitoramento ambiental. Ao desenvolvermos modelos para estimar os indicadores da qualidade da água por meio do uso de imagens de satélite, os custos do monitoramento ambiental são reduzidos, visto que a rotina de realização do monitoramento por amostragem direta já não é mais necessária, sendo realizada apenas para ajustes do modelo gerado.

Entretanto, para obter modelos confiáveis, toda uma pesquisa em campo deve ser estruturada, com equipamentos específicos para aquisição dos dados da

radiação emergente e das propriedades ópticas inerentes ao meio, que trarão informações referentes aos componentes presentes na coluna d'água.

A estruturação de modelos que relacionam a reflectância de sensoriamento remoto às propriedades ópticas inerentes a partir da coleta de dados em campo torna possível a inversão do problema, ou seja, a partir da radiação registrada em um sensor em órbita ou aerotransportado, é possível se obter essas características únicas do ambiente de estudo, que são as propriedades ópticas inerentes.

### **3.6.1 Relação entre a reflectância e as POI**

Tradicionalmente o sensoriamento remoto da cor da água foca na obtenção da concentração de clorofila-*a* sem o entendimento de como o meio aquático funciona, ou em concordância com Zaneveld et al. (2006), modelos são gerados para a obtenção da concentração de pigmentos a partir de reflectâncias, tratando o meio como uma “caixa preta”.

Com o aperfeiçoamento dos sensores, muitos estudos têm enfatizado a importância do entendimento e obtenção das propriedades ópticas inerentes da água, em especial a absorção e o espalhamento, pois estas propriedades caracterizam a água e seus constituintes sem as falhas referentes à geometria do campo de luz (ZANEVELD et al., 2006; FRY, 2013).

Como mostrado por Gordon et al. (1988), Mobley (1994), Jerome et al. (1996) e Kirk (2011), a reflectância de sensoriamento remoto pode ser relacionada às propriedades ópticas inerentes. Essa abordagem física examina como a cor da água se relaciona com as POI e então, como as POI se relacionam com os constituintes do meio para por fim, entender o que esses parâmetros podem nos mostrar sobre a composição da coluna d'água.

Aumentar o entendimento do sinal detectado remotamente aperfeiçoa sua utilização e permite o desenvolvimento de produtos relacionados à biogeoquímica da água (ZANEVELD et al., 2006). Neste contexto, os modelos

ópticos são aqueles que relacionam a reflectância, ou seja, as propriedades ópticas aparentes, às propriedades ópticas inerentes.

O modelo óptico mais utilizado e difundido no meio científico é o modelo de Gordon et al. (1988). Este modelo baseou-se em simulação de Monte Carlo para a resolução da equação de transferência radiativa. Entretanto, foi desenvolvido para águas do Caso 1. Este modelo relaciona a razão entre a irradiância refletida de superfície e o fator Q às propriedades ópticas inerentes do meio pela Equação 3.24.

$$\frac{R}{Q} = 0,0949 \frac{b_b}{a + b_b} \quad \text{Equação 3.24}$$

onde:  $R$  é a razão de irradiância;  $Q$  é a razão da irradiância ascendente pela irradiância descendente;  $a$  é o coeficiente de absorção e  $b_b$  é o coeficiente de retroespalhamento. Entretanto sabemos que:

$$R = \frac{E_u}{E_d} \quad e \quad Q = \frac{E_u}{L_u}$$

Então temos que:

$$\frac{R}{Q} = \frac{E_u}{E_d} \cdot \frac{L_u}{E_u} = \frac{L_u}{E_d} = R_{sr} \quad \text{Equação 3.25}$$

Logo temos que o modelo de Gordon et al. (1988) relaciona a reflectância de sensoriamento remoto às propriedades ópticas inerentes (Equações 3.24 e 3.25).

### 3.6.1.1 Modelos para estimar o retroespalhamento

São poucos os modelos disponíveis para estimar o retroespalhamento a partir da concentração dos componentes da água e, em sua maioria, estes modelos são aplicáveis a águas do Caso 1.



Um modelo para águas do Caso 2 foi desenvolvido por Gallagher (2004). Esse modelo baseou-se nos vários algoritmos disponíveis na literatura para estimar o espalhamento dos componentes presentes na coluna d'água. A esses algoritmos, Gallagher (2004) aplica fatores, chamados “eficiência de retroespalhamento”, os quais quantificam a fração do fluxo retroespalhado em relação ao fluxo incidente. Esses fatores de eficiência do retroespalhamento também foram determinados a partir de dados contidos na literatura. Com isso a autora criou seu modelo para o retroespalhamento total a partir da revisão na literatura correlata acerca dos modelos para o espalhamento acrescido às respectivas eficiências de retroespalhamento de cada componente.

Este modelo é então um somatório do retroespalhamento da água pura, do fitoplâncton e dos sedimentos inorgânicos em suspensão. A equação simplificada do modelo de Gallagher (2004) é a Equação 3.26 que segue:

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bf}(\lambda) + b_{bMS}(\lambda) \quad \text{Equação 3.26}$$

onde:  $b_b(\lambda)$  é o retroespalhamento total,  $b_{bw}(\lambda)$  é o retroespalhamento da água pura,  $b_{bf}(\lambda)$  é o retroespalhamento devido ao fitoplâncton e  $b_{bMS}(\lambda)$  é o retroespalhamento devido aos minerais em suspensão.

Neste modelo não é considerada a contribuição da matéria orgânica dissolvida no retroespalhamento total. Gallagher (2004) considera esse componente como um absorvedor real (do inglês: *true absorber*), o que quer dizer que, devido às suas características como material dissolvido, sua absorção é considerada tão maior que o seu espalhamento que este pode ser negligenciado no atual estado da arte.

Para o retroespalhamento da água pura Gallagher (2004) considera que a eficiência de retroespalhamento é de 50%, dado este que deriva do fato de o espalhamento na água pura ser semelhante ao espalhamento Rayleigh, num processo devido à flutuação de densidade (MOBLEY, 1994), o que significa

que é isotrópico, com 50 % da radiação espalhada em cada um dos hemisférios como descrito na Equação 3.27.

$$b_{bw}(\lambda) = 0,5 \cdot b_w(\lambda) \quad \text{Equação 3.27}$$

onde:  $b_{bw}(\lambda)$  é o retroespalhamento da água pura e  $b_w(\lambda)$  é o espalhamento da água pura. Essa relação pode ser mais bem explicada em Buiteveld (1994) e Bukata et al. (1995).

Com relação ao fitoplâncton, Gallagher (2004) parte dos resultados de Gordon e Morel (1983) e Sathyendranath et al. (1989). A eficiência de retroespalhamento do fitoplâncton foi assumida por Sathyendranath et al. (1989) como sendo 0,5% do espalhamento total. O modelo do espalhamento devido ao fitoplâncton é função da concentração da clorofila-a, como descrito na Equação 3.28.

$$b_{bf}(\lambda) = 0,005 \cdot (0,12 \cdot [chl]^{-0,63}) \cdot \left(\frac{550}{\lambda}\right) \quad \text{Equação 3.28}$$

onde:  $b_{bf}(\lambda)$  é o retroespalhamento devido ao fitoplâncton,  $[chl]$  é a concentração de clorofila-a e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

O termo  $(0,12 \cdot [chl]^{-0,63})$  na Equação 28 foi extraído de Gordon e Morel (1983) e Sathyendranath et al. (1989). Este termo é a função determinada empiricamente que relaciona o espalhamento em 550nm à concentração de clorofila-a na água. O termo  $\left(\frac{550}{\lambda}\right)$  é o que traz a dependência espectral do espalhamento do fitoplâncton. O comprimento de onda de referência usado para descrever essa dependência espectral foi 550nm, pois neste comprimento ocorre a mínima absorção e o máximo espalhamento pela clorofila-a.

Para o retroespalhamento devido a sedimentos em suspensão (Equação 3.29) as referências usadas por Gallagher (2004) foram Twardowski et al. (2001) e

Babin et al. (2003). No caso a concentração utilizada como entrada na equação é a de sedimentos minerais em suspensão, ou seja, a concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão. Dessa forma, a parte orgânica dos sedimentos em suspensão é negligenciada, o que pode ser uma ótima aproximação para estuários ricos em sedimentos inorgânicos, mas pode ser crítico em outros tipos de água onde a fração orgânica seja dominante.

$$b_{bMS}(\lambda) = b_{bMS} \cdot 0,51 \cdot [SM] \cdot \left( \frac{\lambda}{555} \right)^{-0,4} \quad \text{Equação 3.29}$$

onde  $b_{bMS}(\lambda)$  é o retroespalhamento devido aos minerais em suspensão;  $b_{bMS}$  é a eficiência de retroespalhamento ou taxa (razão) de retroespalhamento descrita por Twardowski et al. (2001) como variando entre 0,2% a 4%; (0,51) é o coeficiente de espalhamento por massa específica para águas costeiras de acordo com Babin et al. (2003) expresso em  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $[SM]$  é a concentração de minerais em suspensão (sedimentos inorgânicos em suspensão; do inglês: *suspended minerals*), e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

A potência (-0,4) da Equação 29, é o coeficiente  $\gamma$  descrito por Twardowski et al. (2001) como sendo a inclinação hiperbólica do espectro do espalhamento, estando intimamente ligada ao formato da distribuição do tamanho de partículas em suspensão.

O comprimento de onda de referência escolhido na Equação 29 é o 555, pois, segundo Babin et al. (2003), neste comprimento de onda ocorre o mínimo de absorção, ou seja, a absorção neste comprimento de onda é negligenciável, o que facilita os cálculos do espalhamento.

Assim, o modelo final de Gallagher (2004) é a junção dos modelos individuais anteriores como mostra a Equação 3.30.

$$b_b(\lambda) = 0,5 \cdot b_w(\lambda) + 0,005 \cdot (0,12 \cdot [chl]^{-0,63}) \cdot \left(\frac{550}{\lambda}\right) + b_{bMS} \cdot 0,51 \cdot [SM] \cdot \left(\frac{\lambda}{555}\right)^{-0,4}$$

Equação 3.30

Outro modelo para o retroespalhamento foi obtido por Jerome et al. (1996). Os autores aplicaram simulações Monte Carlo à propagação dos fótons através das águas naturais para determinar a reflectância de sensoriamento remoto de subsuperfície como uma função do tipo de água, ângulo solar zenital e distribuição da radiação incidente.

Como se pode perceber este modelo tem uma abordagem diferente do modelo de Gallagher (2004), pois utiliza a razão  $\frac{b_b}{a}$ , o que os autores chamam de tipo de água (do inglês: *water type*), que é a natureza óptica do corpo d'água em si.

Foi mostrado por esses autores que, para um ângulo de visada nadir:

1. A reflectância de sensoriamento remoto é independente do ângulo solar zenital e da distribuição da radiação incidente;
2. O fator dominante na determinação da reflectância de sensoriamento remoto é a natureza óptica do corpo d'água em si, ou seja, a razão  $\frac{b_b}{a}$ .

Entretanto, os autores ressaltam que, para aplicar medidas de sensoriamento remoto a análise de águas naturais, deve-se atacar o problema inverso, ou seja, deve-se estimar a razão  $\frac{b_b}{a}$  a partir da reflectância de sensoriamento remoto e, só então, será possível estimar remotamente essas propriedades de maneira acurada.

Para endereçar então o problema inverso, os autores consideraram os resultados da simulação Monte Carlo com ângulos zenitais entre 15° e 89° e

com eles obtiveram a equação polinomial descrita na Equação 3.31, com um ajuste de 99% e erro médio de 9%.

$$\left(\frac{b_b}{a}\right) = 0,0027 + (9,87 \cdot R_{sr}) - (34,5 \cdot (R_{sr})^2) + (1534 \cdot (R_{sr})^3) \quad \text{Equação 3.31}$$

Sendo assim, foi também possível obter o retroespalhamento a partir de medidas em campo da reflectância de sensoriamento remoto.



#### 4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhida para esta pesquisa foi o reservatório da usina hidrelétrica de Funil, localizada no médio curso do Rio Paraíba do Sul, no município de Resende, Estado do Rio de Janeiro (Figura 4.1).

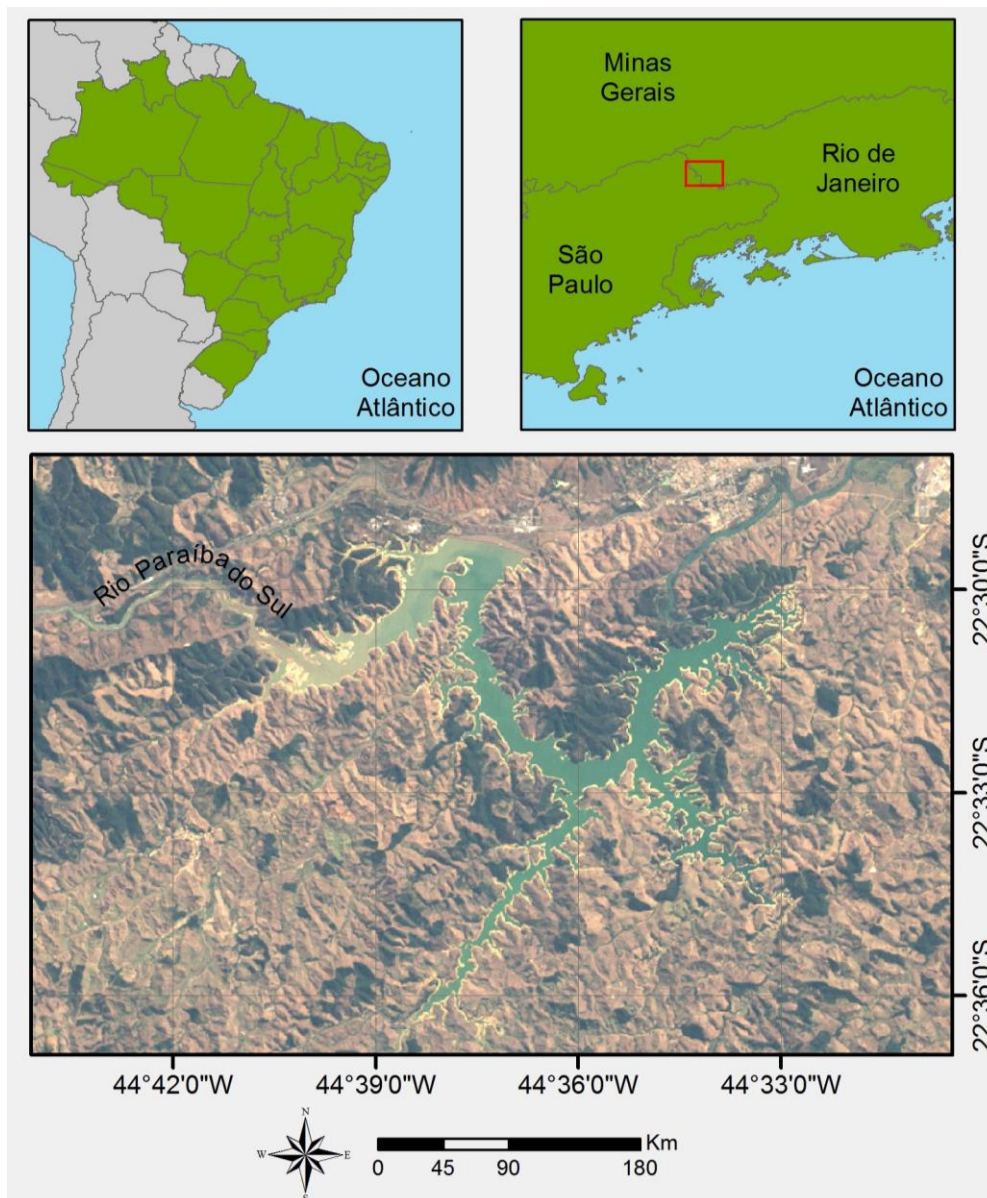


Figura 4.1: Localização do reservatório de Funil.  
Composição Colorida TM-Landsat5 R3G2B1.  
Órbita/Ponto: 218/76.  
Data de Passagem: 05/09/2011

A hidrelétrica entrou em operação ao final de 1969, com capacidade nominal total de geração de 216 MW de potência. A usina é composta por um reservatório com capacidade de armazenamento de 8,9 bilhões de m<sup>3</sup> na cota máxima de 466,5 metros de altitude, e 6,2 bilhões de m<sup>3</sup> de volume útil. Nessa cota altimétrica, a área inundada pelo reservatório é de 40 km<sup>2</sup> (FURNAS, 2013).

O processo de degradação ambiental da bacia do Paraíba do Sul, principal contribuinte e formador do reservatório de Funil, foi desencadeado no século XVII, quando se iniciou a retirada da cobertura vegetal para a cultura da cana de açúcar no trecho paulista do rio. A degradação foi potencializada com a substituição da cultura canavieira pelo ciclo do café. Com o colapso da cultura cafeeira, já com intensa redução da área original de cobertura vegetal no vale do Paraíba do Sul, os problemas originados pela erosão acelerada, assoreamento de rios e perda da fertilidade do solo já eram notáveis. Como consequência, as plantações transformaram-se em pastagens (INEA, 2010).

Atualmente o uso do solo no entorno do reservatório é dedicado principalmente à pecuária extensiva com plantio de eucalipto em algumas regiões, o que propicia o aporte de sedimentos ao reservatório por facilitar os processos erosivos e impedir a regeneração natural da cobertura vegetal. Entretanto, a contribuição de sedimentos provenientes do entorno do reservatório é inexpressiva diante da magnitude do aporte de sedimentos introduzidos pelo próprio rio Paraíba do Sul.

O desenvolvimento industrial e a conseqüente expansão urbana à montante do reservatório auxiliaram a descaracterização da bacia em relação as suas condições ambientais originais, não somente pela devastação quase total da cobertura vegetal, mas também pela expansão urbana e industrial. Neste fator se tem que as principais fontes da poluição hídrica na bacia do Rio Paraíba do Sul são os esgotos domésticos e efluentes industriais, além da exploração de



areia no Vale do Paraíba (INEA, 2010), fatores estes que corroboram ao aumento da turbidez, assoreamento e conseqüente perda da qualidade da água.

Para as regiões situadas a jusante do reservatório, este atua como uma barreira à poluição proveniente do estado de São Paulo. Isso decorre do fato de a construção da barragem e a formação do reservatório terem criado condições para a acumulação de nutrientes, substâncias tóxicas e sedimentos transportados pelo rio Paraíba do Sul.

Vários estudos indicam que o reservatório da UHE Funil se encontrava em adiantado estado de eutrofização já na década final do século XX (BOBEDA, 1993; ROCHA et al., 2002). A alteração da composição físico-biótica da água veio manifestar-se visualmente na formação de intensas florações de cianobactérias com comprometimentos de ordem estética e sanitária ao uso direto das águas (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 1997).

Em um estudo baseado em dados coletados pela plataforma SIMA (STECH, et al., 2006), foram estimadas concentrações de até 100 µg.L<sup>-1</sup> a 2 metros de profundidade (NOVO, et al., 2010). Entretanto, em estudos desenvolvidos pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro (1997) foram registrados valores da ordem de 700 µg.L<sup>-1</sup>. O principal alerta identificado é referente às florações, principalmente de cianobactérias, potencialmente tóxicas que vem ocorrendo com frequência no reservatório do Funil podendo causar sérios riscos a população através do consumo de água potável. (INEA, 2010).

Os prejuízos ambientais e econômicos correm o risco de serem ampliados com a deterioração gradativa da água efluente da Usina ocasionada principalmente por esgotamento de oxigênio dissolvido e a solubilização de compostos originalmente acumulados nos sedimentos do Reservatório (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 1997).



## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Materiais

Nesta seção encontram-se descritos os equipamentos utilizados em campo e os aplicativos utilizados para processar os dados coletados.

#### 5.1.1 Equipamentos

Tem-se uma descrição dos equipamentos utilizados nos trabalhos de campo em Funil.

##### 5.1.1.1 RAMSES-ARC e RAMSES-ACC

Os espectroradiômetros RAMSES-ARC (radiômetro que mede a radiância) e RAMSES-ACC (radiômetro que mede a irradiância), da TriOS (Figura 5.1), foram utilizados para as medidas radiométricas nos pontos amostrais. Estes equipamentos operam da faixa do ultravioleta até o infravermelho próximo do espectro eletromagnético (320 a 950 nm) com uma resolução espectral de 3,3nm. Com eles foram gerados espectros da radiação eletromagnética na coluna d'água, bem como foi medida a radiação emergente da água na superfície.

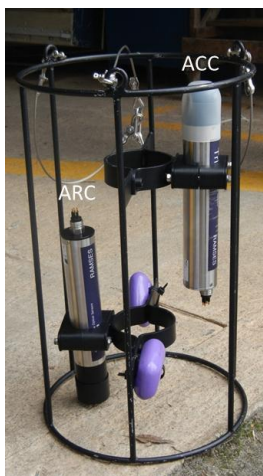


Figura 5.1: Espectroradiômetros da TriOS.

O princípio óptico dos espectroradiômetros da TriOS encontra-se esquematizado na Figura 5.2. A luz é detectada e conduzida por um conjunto de fibras ópticas até a entrada de um policromador, responsável por dispersar a luz em suas cores individuais com uma grade holográfica montada na parte inferior do módulo, por fim as cores são detectadas por um arranjo de 256 fotodiodos.

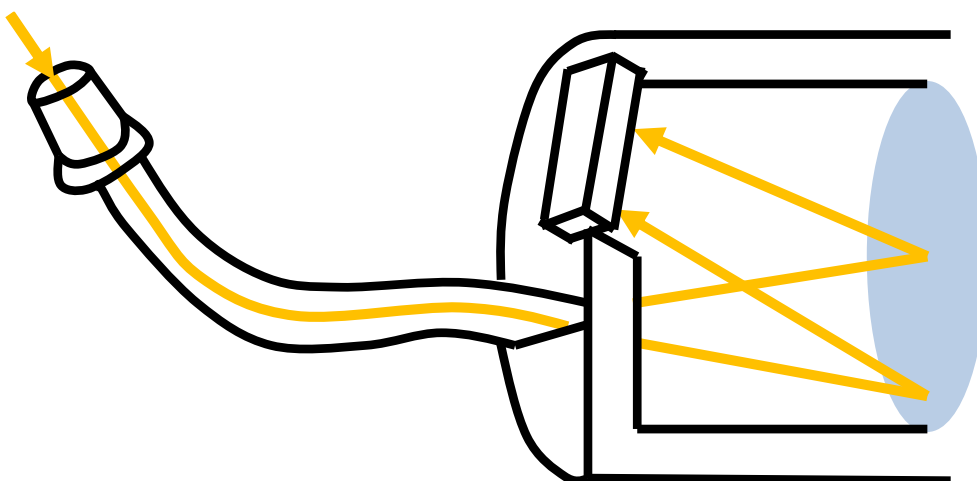


Figura 5.2:Esquema óptico genérico dos espectroradiômetros da TRIOS.  
Fonte: Adaptado de TriOS (2010).

O sensor RAMSES-ARC registra dados de radiância espectral. Seu sistema óptico consiste no presente na Figura 5.3. A fibra óptica da Figura 5.2 é colocada próxima às lentes de modo a fixar o campo de visada em 7°. A parede de proteção contra *spray* não influencia no campo de visada do sensor, esta é apenas uma proteção da janela óptica contra *spray* d'água em medidas realizadas no ar. Para medidas na coluna d'água, essa proteção deve ser removida para evitar a formação de bolhas de ar (TriOS, 2010).

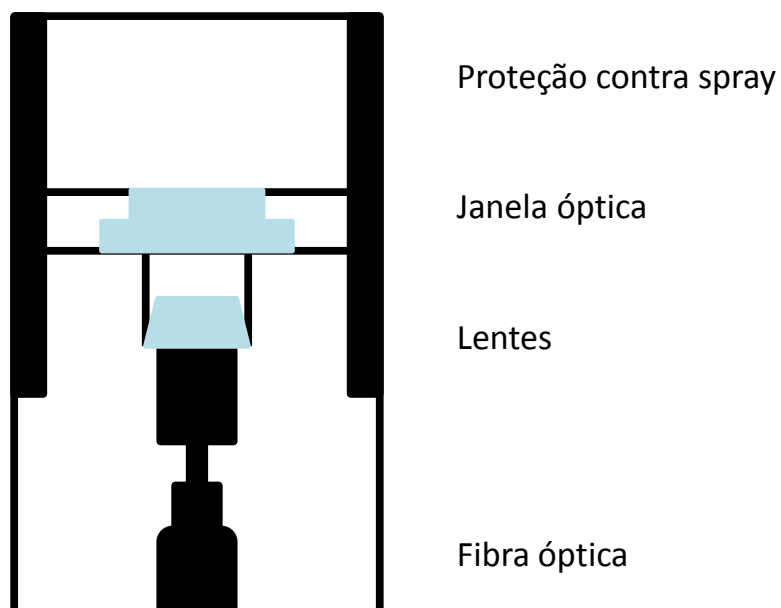


Figura 5.3: Esquema óptico do RAMSES-ARC.  
 Fonte: Adaptado de TriOS (2010).

Na Figura 5.4 tem-se o sistema óptico do sensor RAMSES-ACC, que registra dados de irradiância espectral. A luz é coletada por um difusor plano e detectada pela fibra. O esquema óptico é configurado de modo a que a característica angular da detecção siga uma função cosseno (TriOS, 2010).

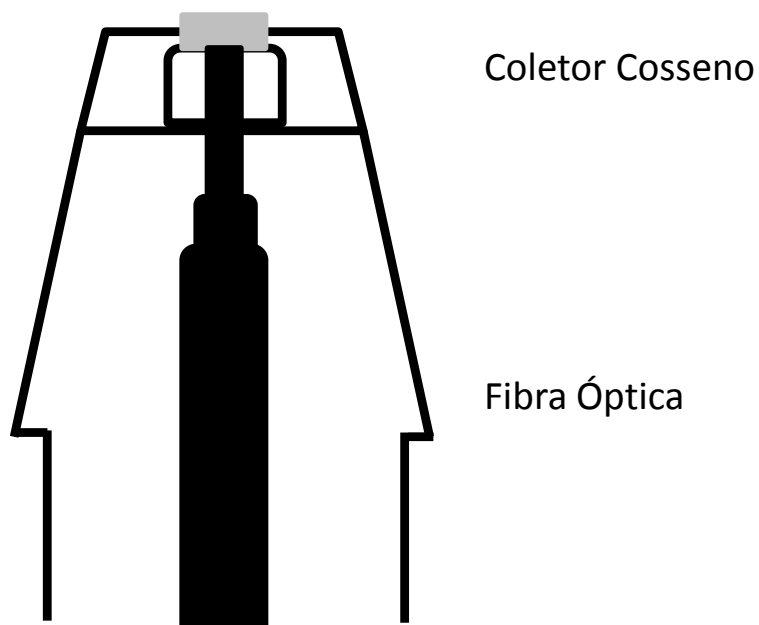


Figura 5.4: Esquema óptico do RAMSES-ACC.  
 Fonte: Adaptado de TriOS (2010).

A Figura 5.5 mostra um esquema da operação desses equipamentos em campo. Os dois sensores mostrados na Figura 5.1 em uma gaiola são os sensores que perfilam a coluna d'água: um deles fica apontado pra cima captando toda a irradiância descendente na coluna, ou seja, toda a luz que está chegando à água; o outro fica apontado para baixo, registrando toda a radiância que está ascendendo na coluna de água, ou seja, aquela luz que interagiu com os componentes e está retornando para a superfície, permitindo assim sua detecção pelo sensor. Este esquema para amostragem na coluna d'água seguiu as recomendações de Zibord (2007), com adaptações.

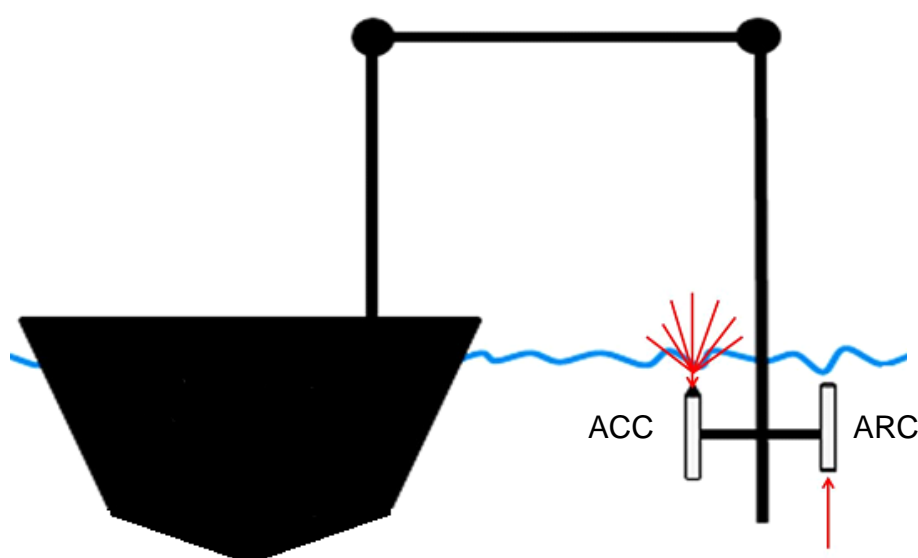


Figura 5.5: Esquema de operação em campo.

Além desses dois sensores, um terceiro sensor de radiância (igual ao referido anteriormente, o RAMSES-ARC) fica fixo na estrutura usinada pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para operação desses sensores em campo. Esse terceiro sensor em destaque na Figura 5.6, é o responsável por registrar a radiância emergente da coluna d'água seguindo o protocolo de aquisição de Hooker et al. (2002) que minimiza a reflexão especular da água, e registrar o comportamento da radiância que está passando pela atmosfera e chegando à superfície (olhando para uma placa padrão), ou seja, aquela radiância que está disponível para interagir com a água e seus componentes.



Figura 5.6: Espectroradiômetros da TRIOS em operação. Em destaque o RAMSES-ARC medindo a radiância emergente da água.

Como pode ser observado na Figura 5.6, os sensores da TriOS são operados por intermédio de um computador com seu *software* de comando (MSDA\_XE - TriOS, 2010) instalado. Todos os sensores são conectados a um coletor de dados (IPS) por cabo, e esse coletor é conectado ao computador. O operador executa a coleta de dados por meio da interface do programa. A coleta pode ser programada para ser realizada de diversos modos à escolha do operador e, ainda, pode-se ver em tempo real os dados coletados por todos os sensores conectados ao computador; o que permite um controle do operador sobre a qualidade dos dados que estão sendo gerados.

Seus sensores podem gerar dados no formato bruto, ou seja, dados da resposta dos detectores diretamente; ou dados calibrados, que são os dados brutos com a aplicação de um arquivo de calibração. Este arquivo de calibração pode ser gerado para água ou para o ar.

### 5.1.1.2 AC-s

A absorção e a atenuação totais dos componentes opticamente ativos foram aferidas pelo do sensor AC-s da WET Labs (Figura 5.7 e 5.8). Este equipamento opera da faixa do visível ao início do infravermelho (400 a 750 nm). Com ele foram gerados perfis espectrais dessas propriedades ópticas na coluna d'água.

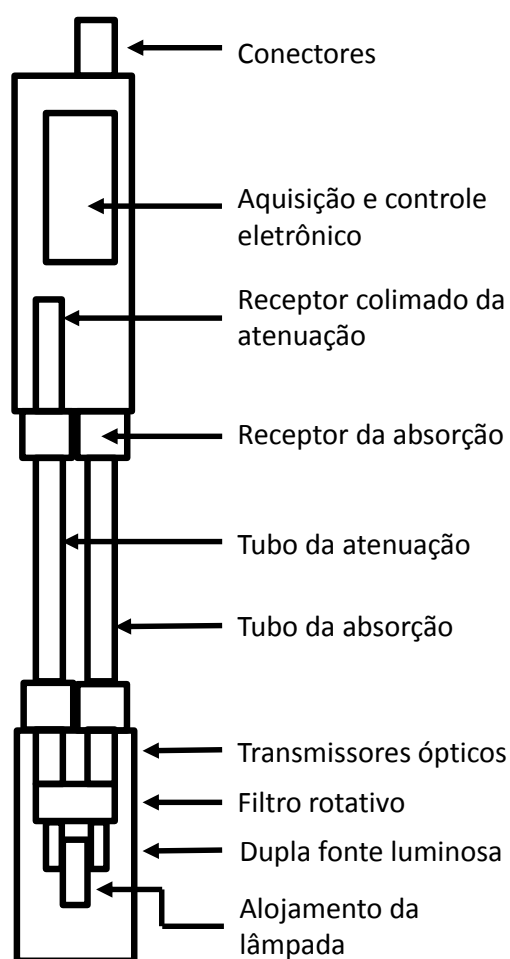


Figura 5.7: Esquema ilustrativo dos componentes do AC-s.  
Fonte: Adaptado de WETLabs (2011).





Figura 5.8: AC-S sendo colocado na água.

O AC-s (do inglês: Absorption and Atenuation - Spectral – lembrar que atenuação é conhecida por  $c$ ) emprega dois caminhos ópticos de 25 cm para a operação em águas naturais: um tubo dedicado à absorção e outro dedicado à atenuação. A fonte de luz utiliza um filtro linear variável com um feixe colimado de uma lâmpada de tungstênio. A parte da absorção tem um tubo refletor e um detector de área grande, enquanto que a parte da atenuação tem um tubo não refletor e um detector colimado. O instrumento fornece uma saída de aproximadamente 80 comprimentos de onda com resolução próxima de 4nm (WET Labs, 2011).

A saída de dados do AC-s se dá em formato binário. Estes dados são convertidos para um formato inteligível no *software WETView* fornecido com o AC-s. A equação de transferência primária para obter o coeficiente de atenuação ( $c$ ) ou o coeficiente de absorção ( $a$ ) para um dado comprimento de onda é a Equação 5.1.

$$T(\lambda) = e^{-c(\lambda)x} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde:  $T$  é a transmitância;  $c$  é o coeficiente de atenuação; e  $x$  é o caminho óptico do volume de água a ser medido (WET LABS, 2009).

A transmitância também é calculada tomando a razão entre o valor do sinal medido e o valor de referência pela Equação 5.2.

$$T(\lambda) = \frac{\left( \frac{C_{sig}(\lambda)}{C_{ref}(\lambda)} \right)}{N} \quad \text{Equação 5.2}$$

onde:  $T$  é a transmitância,  $C_{sig}$  é o sinal medido;  $C_{ref}$  é o valor de referência; e  $N$  é uma constante de calibração específica do instrumento, obtida em laboratório, utilizando água limpa. (WET LABS, 2009).

Igualando a transmitância nas duas equações anteriores tem-se a Equação 5.3.

$$\frac{\left( \frac{C_{sig}(\lambda)}{C_{ref}(\lambda)} \right)}{N} = e^{-c(\lambda)x} \quad \text{Equação 5.3}$$

Pode-se então obter o coeficiente de atenuação (analogamente obtém-se o coeficiente de absorção) pela Equação 5.4.

$$c(\lambda) = \frac{1}{x} \cdot \left[ \ln \left( \frac{C_{sig}(\lambda)}{C_{ref}(\lambda)} \right) - \ln(N) \right] \quad \text{Equação 5.4}$$

O caminho óptico do AC-s é fixo em 25cm. A determinação de  $\ln(N)$  é necessária para medir com precisão  $c$  ou  $a$ . Este valor é determinado para cada um dos canais e é fornecido com a folha de dados de calibração de cada instrumento.

O AC-S pode operar de diferentes formas: por perfilagem, em fundeio ou rebocado pela embarcação. No presente estudo somente a amostragem através de perfilagem vertical foi utilizada.

Neste sistema, o AC-S é montado em conjunto com a bomba (Sea Bird Eletronics, modelo SBE 5T), o sensor de pressão (Sea Bird Eletronics, modelo SBE 50), e a bateria e integrador de dados (DH4, da WET Labs). Todos estes equipamentos são fixados em uma estrutura em alumínio usinada no INPE para a operação deste equipamento em campo (Figura 5.8).

A bomba é responsável pela passagem de água pelos tubos do AC-S, e o sensor de pressão permite recuperar informações de profundidade. A bateria fornece energia para o sistema e o DH4 controla a aquisição e armazenamento dos dados. Dessa forma, não é necessário o uso de microcomputador em campo para operar esse equipamento.

O DH4 é configurado antes da sua operação em campo. Para isso é utilizado seu *software* específico, o *WLHost* (Wetlabs, 2011). No modo perfilagem, é necessário informar: o tempo de espera, que é o tempo necessário para colocar o equipamento na água; o tempo de aquecimento do sistema, que é o tempo necessário para o AC-S entrar em equilíbrio térmico com a água; a frequência de amostragem por segundo; e o tempo total de amostragem em cada ponto.

Nos trabalhos desta pesquisa foram configurados os seguintes tempos: 2 minutos de espera; 5 minutos de aquecimento; frequência de amostragem de 4 Hz; e tempo de amostragem de 10 minutos.

#### **5.1.1.3 Sonda**

A sonda multiparâmetro utilizada em campo (Figura 5.9) foi 6600 da YSI. Este equipamento mediu os parâmetros: oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ), turbidez (NTU), pH e temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).



Figura 5.9: Sonda YSI 6600 em operação.

O sensor de temperatura é um termistor capaz de medir de  $-5^{\circ}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  com uma acurácia de  $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$  a uma resolução de  $0,01^{\circ}\text{C}$ .

A quantidade de oxigênio dissolvido é medida por um sensor de pulso rápido do tipo Clark. Seu range de medida vai de 0 a  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  de oxigênio dissolvido com uma precisão que varia de  $\pm 2\%$  a  $\pm 6\%$  dependendo do valor apresentado; e com resolução de  $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ .

O sensor de pH é um sensor de eletrodo de vidro combinado que pode medir de 0 a 14 unidades com acurácia de  $\pm 0,2$  unidades e resolução de 0,01 unidades.

A turbidez é medida por um sensor óptico capaz de captar de 0 a 1000 NTU com precisão de  $\pm 2\%$  de valor medido ou 0,3 NTU (o maior dos dois) e uma resolução de 0,1 NTU. Todos os dados referentes à sonda foram retirados de YSI (2011).

### 5.1.2 Aplicativos

O *software* utilizado para o processamento dos dados e plotagem dos resultados foi o Origin Pro, versão 8 (ORIGIN LAB CORPORATION, 2007).

## 5.2 Métodos

Esta seção se divide em duas grandes partes fundamentais: a caracterização bio-óptica do reservatório de Funil (Figura 5.10); e os modelos ópticos aplicados aos dados coletados (Figura 5.11).

Na seção de caracterização bio-óptica são descritos os parâmetros medidos bem como os obtidos pelo processamento dos dados em campo. Na seção de modelos ópticos são analisados os modelos ópticos utilizados.

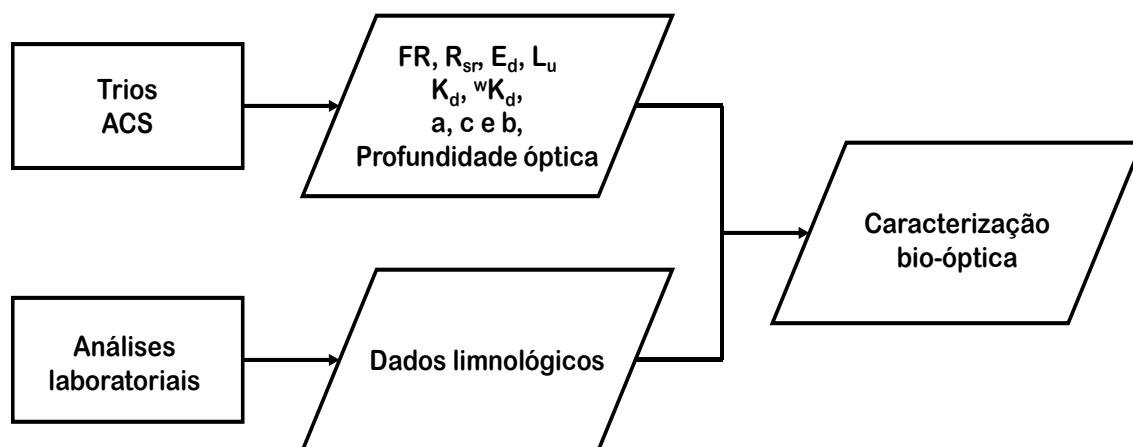


Figura 5.10: Fluxograma da primeira parte da pesquisa.

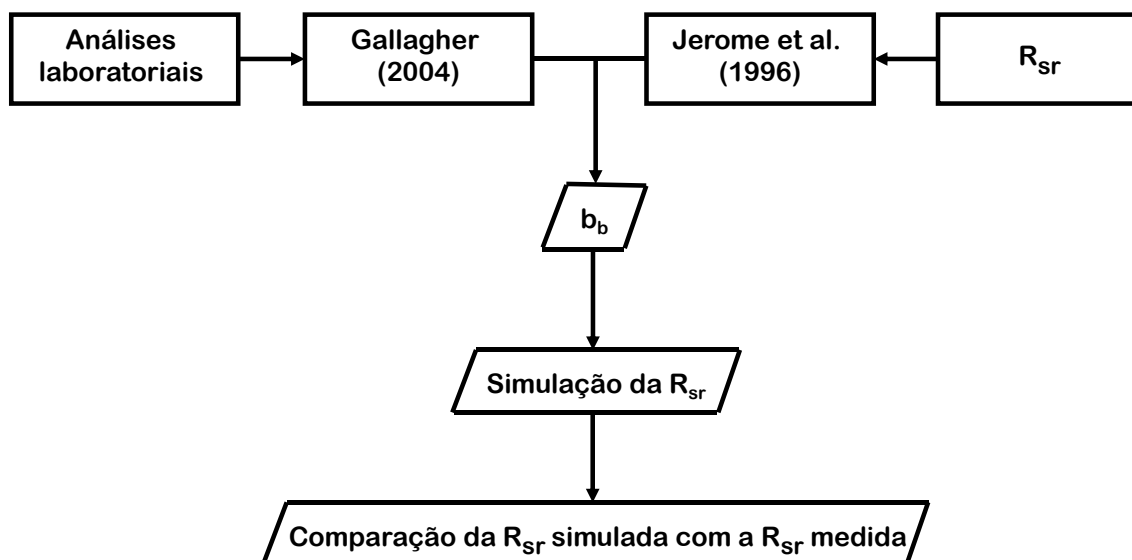


Figura 5.11: Fluxograma da segunda parte da pesquisa.

### 5.2.1 Amostragem em campo

A Figura 5.12 mostra o esquema amostral planejado para os dois trabalhos de campo destinados a esta pesquisa em Funil. Pode-se perceber que foram planejados pontos amostrais distribuídos homogeneamente sobre o espelho d'água do reservatório.

A amostragem nas campanhas foi realizada com dois barcos. Um barco foi responsável por carregar os sensores da TriOS em sua estrutura, e o outro responsável por levar o AC-S, a sonda e realizar a coleta de amostras de água. Para as operações de campo duas pessoas eram necessárias para operar os sensores da TriOS, outras duas eram necessárias para operar o AC-s, além de uma pessoa designada para operar a sonda e coletar as amostras de água.

Os dados do AC-s e sonda foram coletados em perfil na coluna d'água; os dados dos sensores da TriOS foram tomados de metro em metro; e as amostras de água são superficiais.

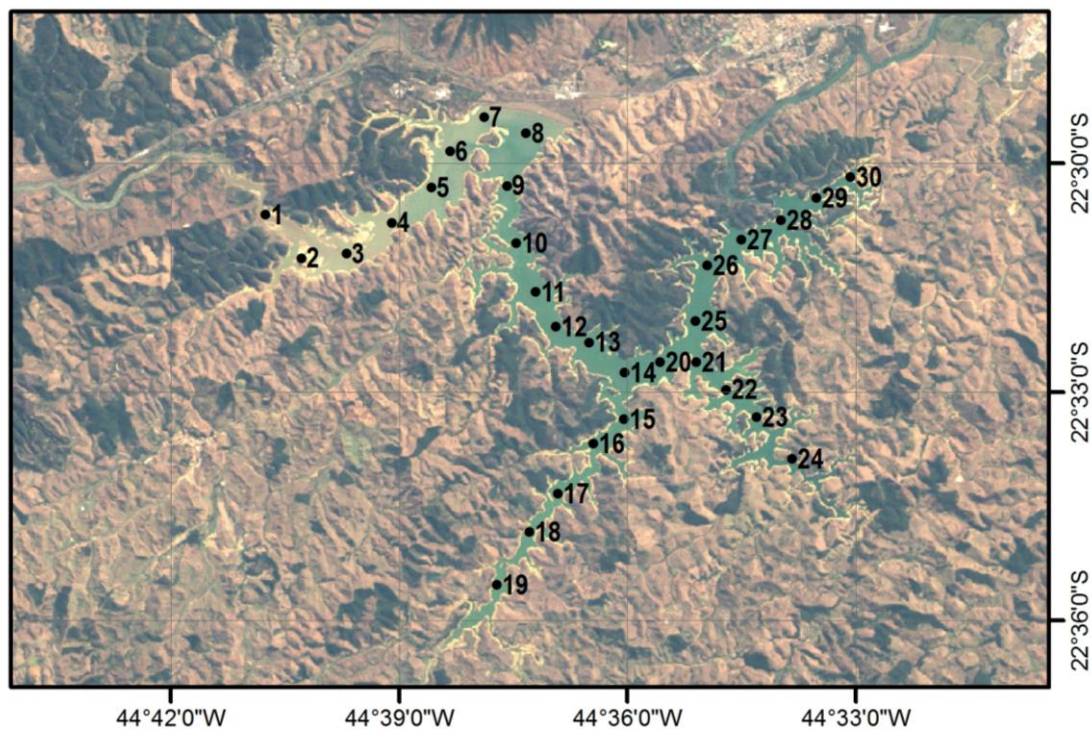


Figura 5.12:Esquema amostral planejado para os trabalhos de campo.  
 Composição Colorida TM-Landsat5 R3G2B1.  
 Órbita/Ponto: 218/76.  
 Data de Passagem: 05/09/2011

### 5.2.2 Primeira campanha de campo

A primeira campanha de campo foi realizada de 20 a 22 de maio de 2012, momento em que o reservatório estava com nível alto, operando com 70% de sua capacidade total. Nesta campanha foram amostrados os pontos presentes na Figura 5.13.

Nem todos os pontos planejados puderam ser amostrados devido às condições climáticas adversas à amostragem que ocorreram no primeiro dia de trabalho. Com muitas nuvens e chuva fina a radiometria ficou comprometida. A coleta de dados pelos sensores da TriOS foi inviabilizada, pois esses sensores dependem de fonte externa de radiação, no caso o Sol. Além disso, um computador é utilizado para manuseio dos sensores RAMSES e algumas

medidas necessitam da placa de referência para sua realização. Estes materiais não podem ser manuseados sob a possibilidade de serem molhados.

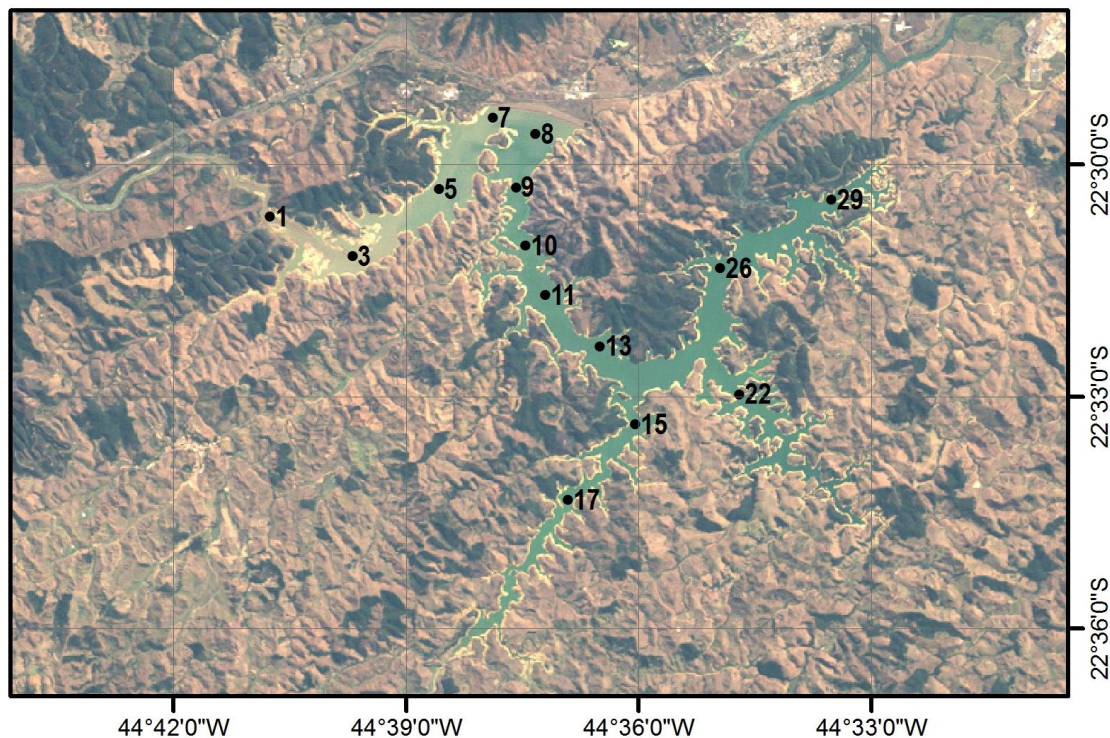


Figura 5.13: Pontos amostrados realizados na primeira campanha de campo.  
Composição Colorida TM-Landsat5 R3G2B1.  
Órbita/Ponto: 218/76.  
Data de Passagem: 05/09/2011

### 5.2.3 Segunda campanha de campo

A segunda campanha de campo foi realizada de 02 a 04 de setembro de 2012, momento em que o reservatório estava bastante baixo devido ao longo período de seca. Nesta época o rebaixamento do nível d'água com relação à campanha anterior chegou a mais de 10 metros. Esse fato impossibilitou a realização de medidas em todos os pontos planejados visto que com o deplecionamento do reservatório alguns pontos caíram em terra firme.

Foram realizados os pontos amostrais mostrados na Figura 5.14. As condições climáticas do último dia de amostragem não foram favoráveis à realização do trabalho. O céu estava completamente encoberto por nuvens e a chuva e o



vento eram constantes. Neste dia optou-se por abortar o campo salvaguardando a equipe embarcada e os equipamentos utilizados.

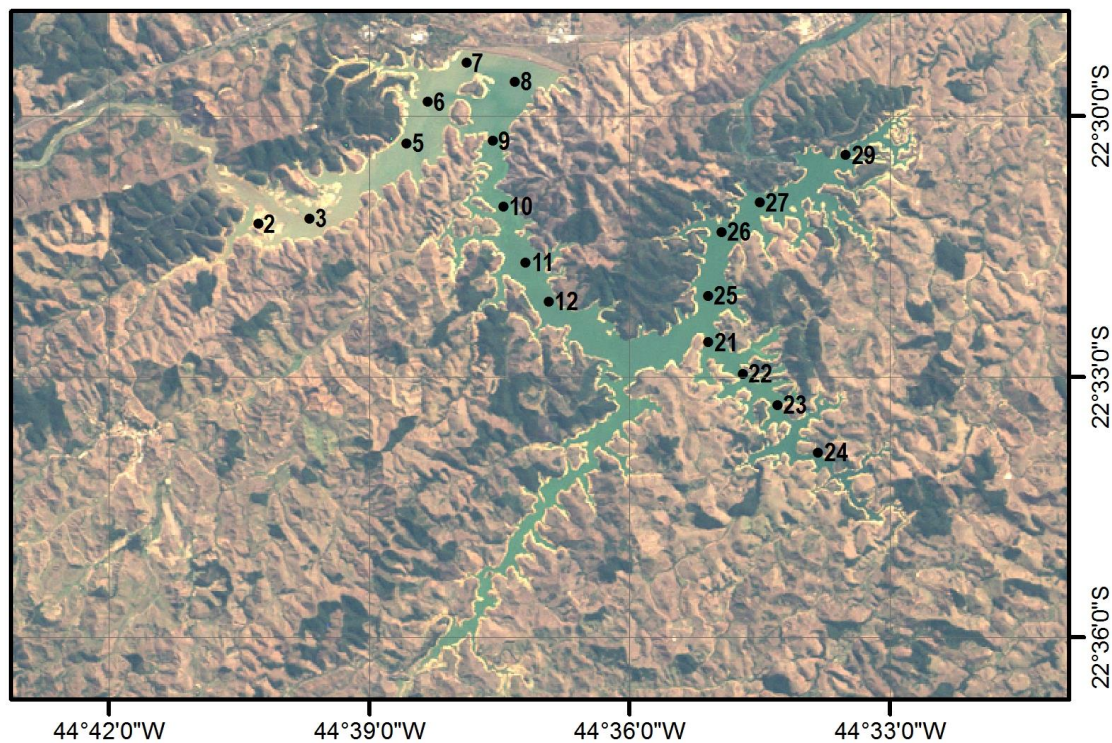


Figura 5.14: Pontos amostrados realizados na segunda campanha de campo. Composição Colorida TM-Landsat5 R3G2B1. Órbita/Ponto: 218/76. Data de Passagem: 05/09/2011

### 5.2.3.1 Caracterização bio-óptica

Para compor a caracterização bio-óptica do reservatório foram realizadas medidas em cada ponto amostrado que possibilitaram a obtenção dos seguintes parâmetros espectrais: irradiância descendente, radiância ascendente, fator de reflectância, reflectância de sensoriamento remoto, coeficiente de atenuação vertical, coeficiente de atenuação vertical ponderado, profundidade óptica, atenuação, absorção e o espalhamento.

Foram escolhidos 10 pontos para serem trabalhados nesta pesquisa. Esses pontos são aqueles que puderam ser realizados em ambas as campanhas de campo (Figura 5.15). Nem todos os pontos puderam ser amostrados em ambas

as campanhas em decorrência da redução do nível d'água do reservatório e também das condições climáticas nos dias de coleta. A escolha de analisar os pontos amostrados em ambas as campanhas foi pautada na possibilidade de comparação entre as duas datas.

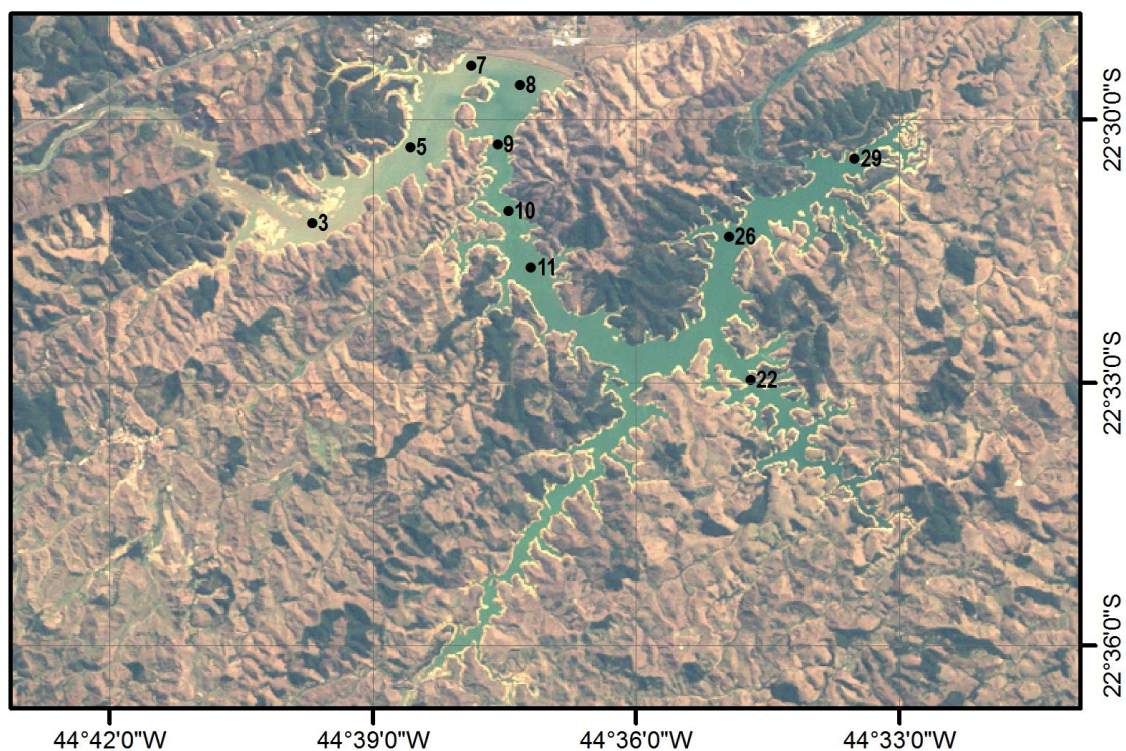


Figura 5.15: Pontos amostrais analisados na caracterização bio-óptica.  
Composição Colorida TM-Landsat5 R3G2B1.  
Órbita/Ponto: 218/76.  
Data de Passagem: 05/09/2011

### 5.2.3.2 Irradiância descendente ( $E_d$ )

A irradiância descendente espectral foi obtida pelo sensor RAMSES-ACC. Este sensor foi colocado apontado pra cima na gaiola (Figura 5.1) de modo a registrar toda a energia radiante do hemisfério acima do sensor.

Os valores deste parâmetro foram registrados acima da superfície e na coluna d'água de metro em metro até que o valor obtido em 550nm fosse menor do que aquele esperado para limite da zona eufótica (1% do valor de subsuperfície em 550nm).

### 5.2.3.3 Radiância Ascendente (Lu)

A radiância ascendente espectral foi obtida pelo sensor RAMSES-ARC. Este sensor foi colocado apontado pra baixo na gaiola (Figura 5.1) de modo a registrar toda radiância que está emergindo dentro do FOV do sensor ( $7^\circ$ ).

Os valores deste parâmetro foram registrados acima da superfície e na coluna d'água de metro em metro acompanhando as medidas do sensor RAMSES-ACC.

### 5.2.3.4 Fator de Reflectância (FR)

O fator de reflectância nesta pesquisa é a razão da radiância que está emergindo da água para a superfície ( $L_a$  - radiância do alvo), dividido por aquela que está disponível na superfície da água ( $L_p$  - radiância da placa de referência) como mostrado na Equação 3.6.

Deveria ser aplicado o fator de correção da placa ( $K$ ), entretanto a placa era nova e bem conservada, sem evidências de degradação, portanto esse fator foi tomado como tendo valor igual a um em todos os comprimentos de onda de interesse.

O  $FR$  foi obtido posicionando-se o barco alinhado com o Sol e coletando os dados perpendicularmente a esta linha imaginária (Figura 5.16) para minimizar os efeitos de reflexão especular e ondulações na superfície da água (Hooker et al., 2002).

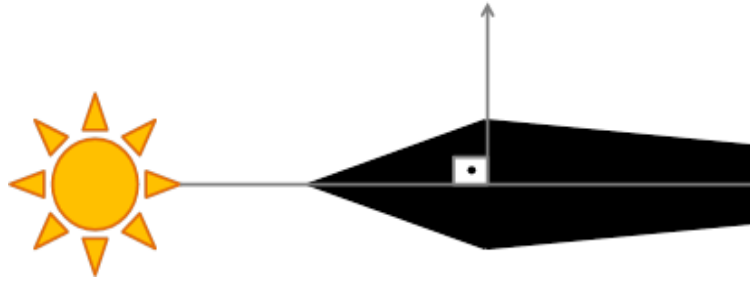


Figura 5.16: Posicionamento do barco e direção de visada do sensor com o azimute.

Com relação ao zênite, o sensor de radiância (RAMSESA-ARC) foi apontado para a água formando um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  (Figura 5.17). Com esse sensor foram coletados dados de radiância emergente da água e da placa lambertiana padrão para a obtenção do Fator de Reflectância.

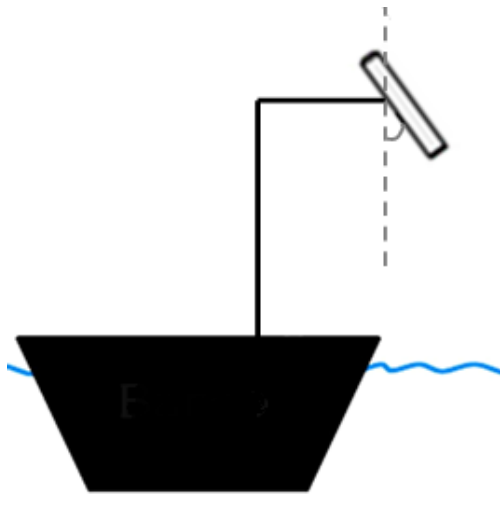


Figura 5.17: Ângulo do sensor com o zênite.

### 5.2.3.5 Reflectância de Sensoriamento Remoto (RSR)

A reflectância de sensoriamento remoto,  $R_{sr}$ , foi obtida pela Equação 3.17. Para este trabalho os valores de radiância e irradiância utilizados são de subsuperfície ( $z = 0^-$ ), com os sensores apontados para o nadir no caso da radiância ascendente  $L_u$  na coluna d'água; e para o zênite no caso da irradiância descendente na coluna  $E_d$ .

### 5.2.3.6 Coeficiente de atenuação difusa vertical

O coeficiente de atenuação vertical ( $K_d$ ) é o logaritmo da taxa de mudança da irradiância descendente com relação à profundidade, sendo expresso pela Equação 3.19. Para os cálculos deste trabalho utilizou-se a Equação 5.5 análoga.

$$K_d = \frac{1}{z_2 - z_1} \cdot \ln \frac{E_d(z_1)}{E_d(z_2)} \quad \text{Equação 5.5}$$

Esse cálculo foi realizado em todos os pontos das campanhas de campo que possuíam medidas radiométricas do sensor RAMSES-ACC. Em cada ponto foi calculado o  $K_d$  espectral (de 400 a 750nm) de metro em metro, como demonstra o esquema da Figura 5.18. Foi realizado, ainda, o cálculo da média e do desvio padrão deste parâmetro para verificar sua constância em profundidade. Ressalta-se que os dados de irradiância não foram normalizados por não haver um sensor de irradiância dedicado a coletar a irradiância disponível na superfície da água simultaneamente às medidas em coluna.

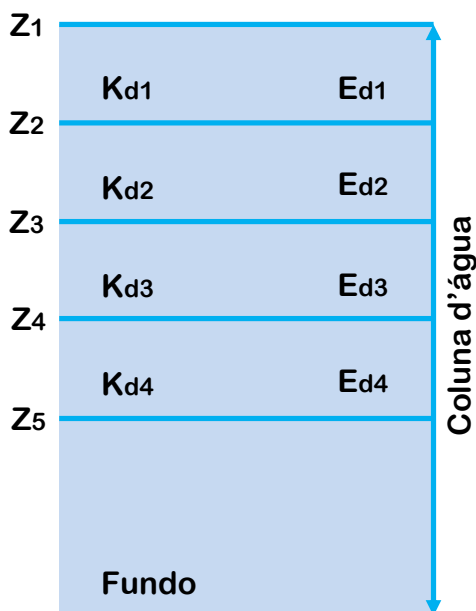


Figura 5.18: Imagem esquemática de uma coluna d'água em campo.

### 5.2.3.7 Coeficiente de atenuação vertical ponderado

O coeficiente ponderado de atenuação vertical da irradiância descendente é o produto de  $K_d(z)$  e  $E_d(z)$  integrado em todas as profundidades, dividido pela integral de  $E_d(z)$  em todas as profundidades (Equação 20).

Na prática, para determinar o  ${}^wK_d(z)$  utiliza-se o dado de  $E_d(z)$  para uma série de profundidades em intervalos iguais até uma profundidade abaixo da qual a luz restante é aproximadamente 1% da total na coluna d'água, ou seja, até o fim da zona eufótica. Isso é realizado pela Equação 21 previamente enunciada.

Entretanto, na Equação 3.21 o termo  $K_d(z_i; z_{i+2})$  é utilizado para suavização do perfil espectral de  $K_d$  (KIRK, 2011). Esta suavização não foi aplicada nesta pesquisa, portanto a equação anterior foi aplicada seguindo a Equação 5.6.

$${}^wK_d = \frac{\sum_{i=1}^N K_d(z_i) \cdot E_d(z_i)}{\sum_{i=1}^N E_d(z_i)} \quad \text{Equação 5.6}$$

### 5.2.3.8 Profundidade óptica

Como citado na seção de fundamentação teórica, as profundidades ópticas de interesse em termos de produtividade primária são aquelas nas quais a irradiância descendente é reduzida a 10% e 1% do seu valor de subsuperfície (KIRK, 2011). Essas profundidades ópticas são obtidas pelas Equações 3.18 e 3.23.

Para uma redução a 10% do valor de subsuperfície, ou seja,  $E_d(z) = 0,1E_d(0)$ :

$$0,1 \cdot E_d(0) = E_d(0) \cdot e^{-\xi}$$

$$0,1 = e^{-\xi}$$

$$\ln 0,1 = -\xi$$

$$\xi = 2,3$$

Como, por definição, a profundidade óptica é o produto do coeficiente de atenuação vertical e da profundidade física, utilizando-se os valores médios do coeficiente de atenuação vertical para cada ponto, é possível encontrar a profundidade física correspondente.

Analogamente, pôde-se encontrar o valor da profundidade física para uma redução a 1% do valor de subsuperfície, ou seja,  $E_d(z) = 0,01E_d(0)$ , sendo esta a profundidade física limite da zona eufótica.

$$0,01 \cdot E_d(0) = E_d(0) \cdot e^{-\xi}$$

$$0,01 = e^{-\xi}$$

$$\ln 0,01 = -\xi$$

$$\xi = 4,6$$

Deste modo foi possível definir os limites físicos da zona eufótica em todos os pontos amostrais.

### **5.2.3.9 Atenuação, absorção e espalhamento**

A atenuação e a absorção espectrais são os parâmetros medidos pelo AC-s. Estes coeficientes são medidos em caminhos ópticos e comprimentos de onda distintos, entre 400 e 750 nm, com uma resolução de aproximadamente 4nm.

O equipamento grava arquivos binários que precisam ser convertidos para um formato legível e, só após isso, são processados. No programa *OriginPro* estes arquivos foram interpolados usando um interpolador linear simples de forma a obter o espalhamento pela subtração dos dados de absorção daqueles de

atenuação. Isso foi necessário, pois os dados de saída do AC-s de absorção e atenuação tem a mesma resolução espectral, porém não possuem o mesmo posicionamento central das bandas espectrais. Com isso tem-se os dados de atenuação, absorção e espalhamento espectrais.

Uma observação importante referente aos dados provenientes deste equipamento é que é sabido na literatura correlata que, sobre os dados do coeficiente de absorção, deve ser aplicada a correção pelo espalhamento. Essa correção leva em conta que na região do infravermelho do espectro eletromagnético não deveria haver absorção pelos componentes, pois a água deveria ter absorvido tudo. Portanto o valor de absorção em um comprimento de onda específico do infravermelho deveria ser retirado de todo o espectro do coeficiente de absorção e adicionado ao espectro do coeficiente de espalhamento (WET Labs, 2011).

Isso é viável em águas do caso 1, cuja contribuição dos sedimentos em suspensão é negligenciável quando existe. Aqui essa premissa não é verdadeira, por isso convencionou-se não aplicar a correção a esses dados até que uma correção mais adequada seja encontrada ou desenvolvida.

#### **5.2.4 Modelos ópticos**

O modelo óptico escolhido para ser usado nessa pesquisa é o modelo de Gordon et al. (1988) mostrado na Equação 3.24. Para a aplicação desse modelo foram utilizados como dados de entrada:

- Coeficiente de absorção total espectral: soma do coeficiente de absorção espectral dos componentes da coluna d'água, obtido em campo com AC-s; e do coeficiente de absorção espectral da água pura, proveniente de Pope e Fry (1997);
- Coeficiente de retroespalhamento total obtido por dois modelos de estimativa distintos:



- Gallagher (2004);
- Jerome et al. (1996).

Como foram utilizados dois modelos de estimativa de retroespalhamento distintos, foram então obtidos dois modelos também distintos para a  $R_{sr}$  estimada. Estes dois modelos foram comparados com os dados de  $R_{sr}$  obtidos pelos sensores da TriOS em ambas as campanhas de campo.



## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Optou-se por dividir essa seção em duas. A primeira é referente à caracterização bio-óptica do reservatório e a segunda é diz respeito à aplicação dos modelos ópticos.

### **6.1 Caracterização bio-óptica**

Nesta subseção os parâmetros espectrais foram comparados entre campanhas e relacionados às concentrações dos constituintes opticamente ativos na água em cada ponto visando entender as feições presentes nas curvas espectrais.

#### **6.1.1 Comparação entre campanhas**

Pela análise da Tabela 6-1 algumas diferenças entre as duas campanhas ficam evidentes. Nota-se que não há grande discrepância entre os valores de média e mediana para os parâmetros limnológicos aferidos no campo em Maio. Entretanto, no campo realizado em Setembro há muita discrepância entre a média e a mediana dos parâmetros Clorofila-a (chl-a) e Material em Suspensão Total (MST).

Essa discrepância indica uma tendência à concentração dos dados no Q1 ou no Q3. Isso ocorre, pois a média é mais influenciada por valores extremos. Assim, por apresentar maior discrepância entre essas medidas estatísticas, fica demonstrado que no campo de Setembro houve uma maior quantidade de pontos amostrais com alta concentração de MST e Chl-a.

Tabela 6-1: Sumário estatístico dos dados limnológicos.

Onde: Chl-a é referente à clorofila-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ); MST é referente ao Material em Suspensão Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ ); e CDT é referente ao Carbono Dissolvido Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

		Mediana	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio Padrão
Maio	Chl-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	5,1	7,7	18,0	2,7	15,3	5,4
	MST ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	2,6	3,4	10,2	1,5	8,7	2,6
	CDT ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	6,0	6,2	6,8	5,7	1,1	0,4
Setembro	Chl-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	33,0	90,9	306,0	4,4	301,7	104,1
	MST ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	11,2	21,8	64,0	3,4	60,7	20,9
	CDT ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	7,2	7,3	8,0	6,1	1,9	0,6

Evidencia-se ainda a discrepância entre os máximos de Chl-a e MST nas duas campanhas de campo. Na campanha de Maio o máximo de Chl-a era de 18,0  $\mu\text{g.L}^{-1}$  enquanto em Setembro o máximo foi de 306,0  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . Referente aos dados de MST: em Maio o máximo se deu em 10,2  $\text{mg.L}^{-1}$ , já em Setembro, o máximo foi 64,0  $\text{mg.L}^{-1}$ .

Outro fato relevante a ser observado na Tabela 6-1 é referente à amplitude dos valores aferidos nos pontos amostrais para os parâmetros Chl-a e MST. A ordem de magnitude da amplitude dos dados no campo de Maio é diminuta quando comparada àquela apresentada para o campo de Setembro. Essa característica demonstra a maior homogeneidade das amostras de água no campo de Maio com relação ao de Setembro. Enquanto a amplitude no campo

de Maio é de  $15,3 \mu\text{g.L}^{-1}$  para a Chl-a e  $8,7 \text{mg.L}^{-1}$  para o MST; no campo de Setembro a amplitude foi de  $301,7 \mu\text{g.L}^{-1}$  para a Chl-a e  $60,6 \text{mg.L}^{-1}$  para o MST. Isso pode indicar que no campo de Setembro têm-se diferentes massas d'água enquanto em Maio tem-se, provavelmente, apenas uma. Outro indicio dessa hipótese é o desvio padrão para esses mesmos parâmetros, essa medida de dispersão estatística foi de  $5,4 \mu\text{g.L}^{-1}$  em Maio até  $104,1 \mu\text{g.L}^{-1}$  em Setembro para os dados de Chl-a; e de  $2,6 \text{mg.L}^{-1}$  em Maio para  $20,9 \text{mg.L}^{-1}$  em Setembro para os dados de MST.

Nas Figura 6.1 e 6.2 têm-se os *box-plots* para os parâmetros Clorofila-a, Material em Suspensão Total e Carbono Dissolvido Total aferidos na campanha de campo realizada em Maio. Nota-se na Figura 6.1 uma distribuição bastante homogênea dos dados em Maio, com a presença de um possível *outlier* nos dados de MST, o ponto amostral 07. Já em Setembro (Figura 6.2) fica clara a maior amplitude dos dados bem como as maiores tendências de dados concentrados no Q1 ou no Q3.

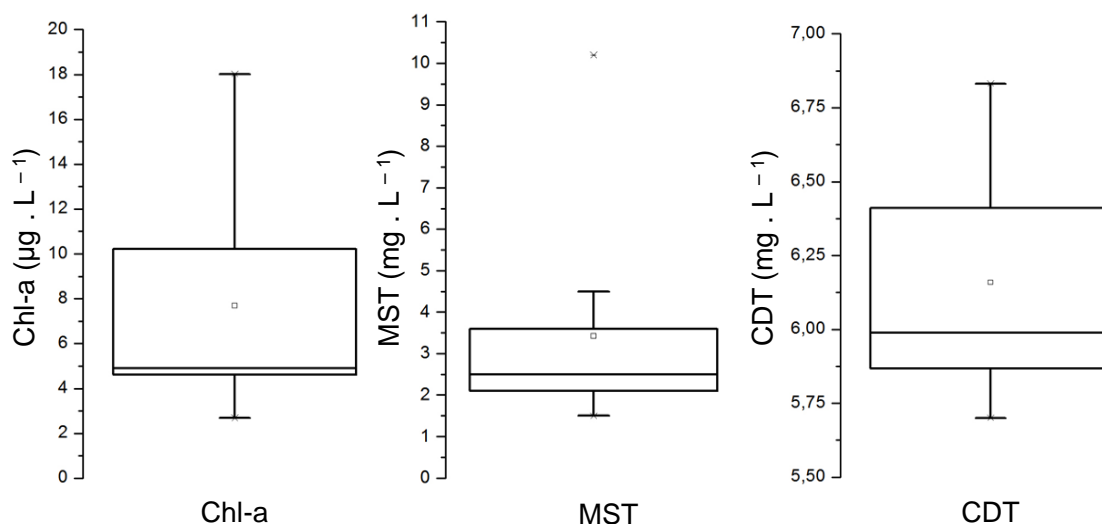


Figura 6.1: Box-plots da distribuição das concentrações de: Clorofila-a (Chl-a), Material em Suspensão Total (MST) e Carbono Dissolvido Total (CDT). Campanha de Maio.

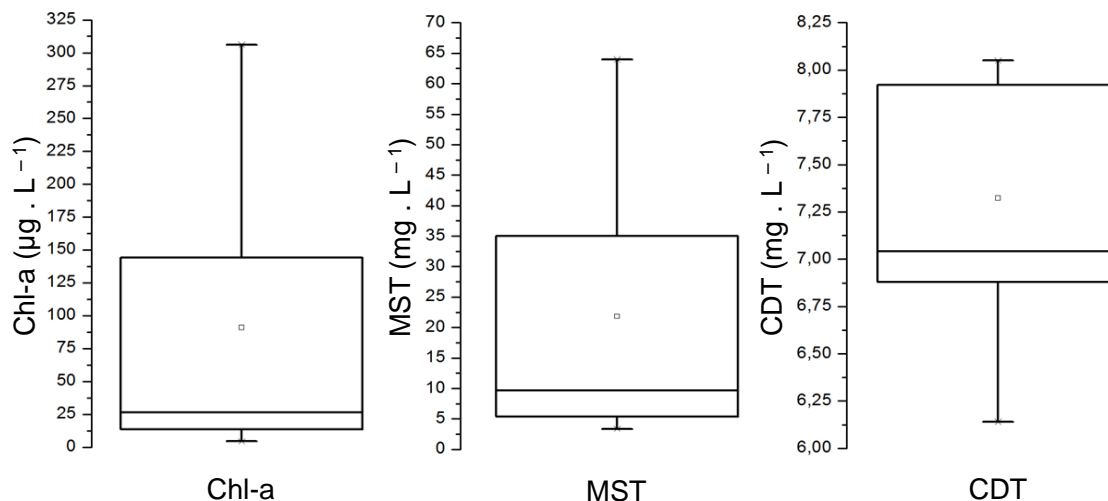


Figura 6.2: Box-plots da distribuição das concentrações de: Clorofila-a (Chl-a), Material em Suspensão Total (MST) e Carbono Dissolvido Total (CDT). Campanha de Setembro.

Pela análise dos dados radiométricos mostrados nas Figuras 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6, pode-se perceber que eles vêm reafirmar os dados estatísticos da Tabela 6-1. A observação das curvas do coeficiente de absorção espectral total em subsuperfície (Figura 6.3) em cada ponto mostra a presença de diferentes massas d'água no campo de Setembro (Figura 6.3-B), enquanto em Maio (Figura 6.3-A) tem-se uma homogeneidade do coeficiente de absorção espectral em todos os pontos analisados.

Na Figura 6.3-B ficou evidente o pico de absorção da clorofila-a em aproximadamente 680nm. Neste mesmo item para as curvas dos pontos amostrais 08, 10 e 07, observa-se ainda um mínimo de absorção próximo a 550nm, região associada ao máximo de espalhamento pela clorofila-a, e um patamar de absorção por volta de 620nm que é relacionado na literatura à absorção pela ficocianina presente em cianobactérias (LONDE, 2008)

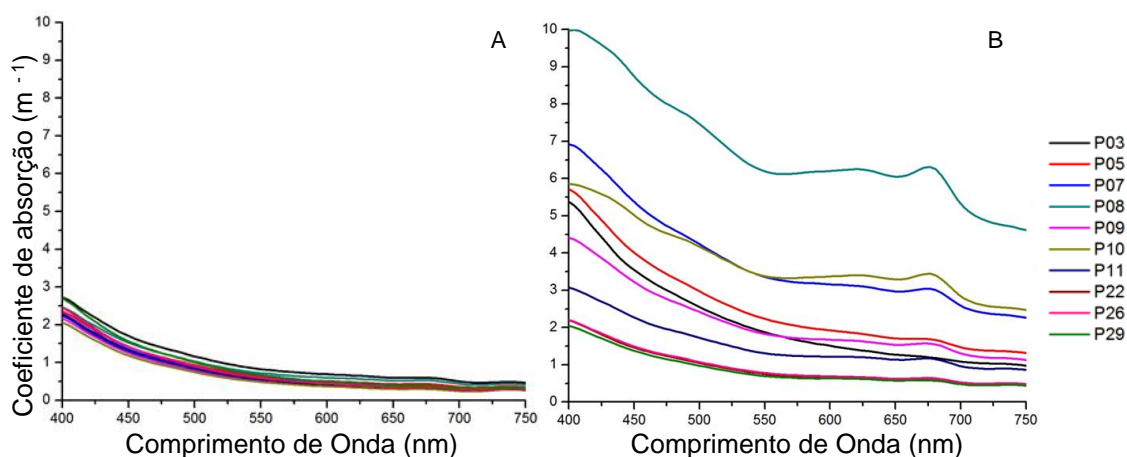


Figura 6.3: Curvas espectrais do Coeficiente de Absorção Total para: (A) Maio; (B) Setembro.

O mesmo se repete para o dado do Coeficiente Ponderado de Atenuação Difusa Vertical ( $^wK_d$  - Figura 6.4). A homogeneidade entre pontos mostrada na Figura 6.4-A não se repete na Figura 6.4-B.

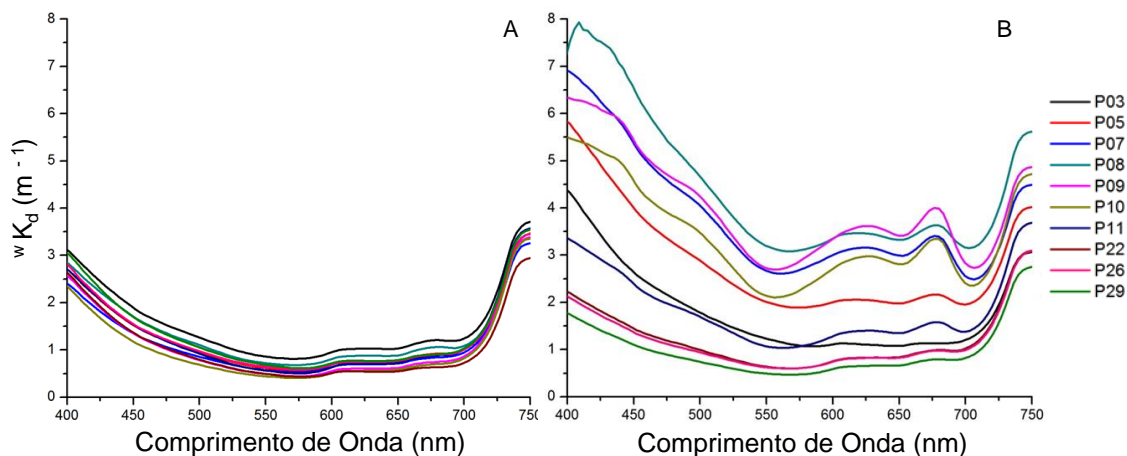


Figura 6.4: Curvas espectrais do Coeficiente de Atenuação Difusa Vertical Ponderado para: (A) Maio; (B) Setembro.

Para a Reflectância de Sensoriamento Remoto ( $R_{sr}$  - Figura 6.5) e para o Fator de Reflectância ( $FR$ , Figura 6.6) fica clara a mudança na complexidade entre os dados dos dois campos. Esses dados refletem o comportamento espectral dos pontos analisados, observa-se então que em Maio o reservatório pode ser caracterizado com um comportamento espectral quase homogêneo, mas em Setembro não.

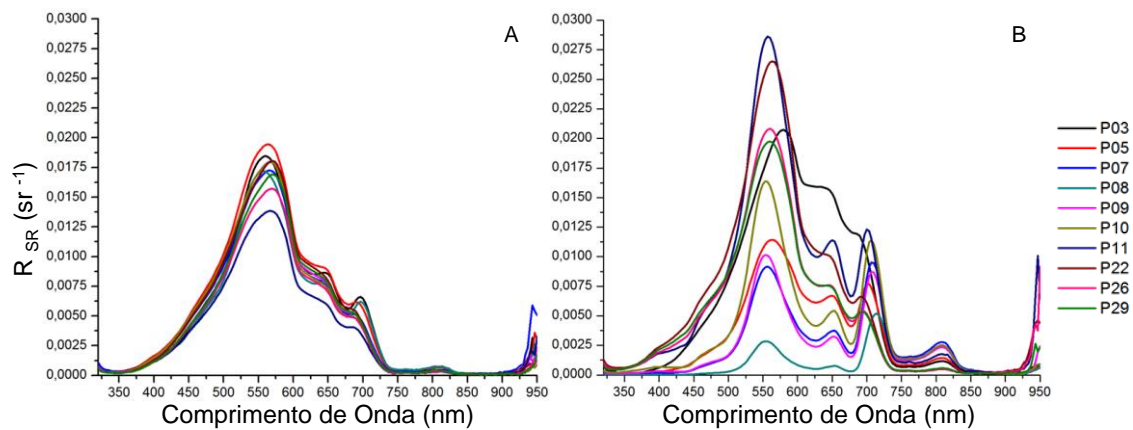


Figura 6.5: Curvas espectrais da Reflectância de Sensoriamento Remoto para: (A) Maio; (B) Setembro.

Na Figura 6.5-A fica evidente o pico do espalhamento pelo fitoplâncton em aproximadamente 560nm se deslocando em direção ao 550nm com o aumento da concentração de clorofila-a como observado por Londe (2008). Observa-se ainda a presença da feição de absorção em 620 associada à ficocianina (feição de absorção das cianobactérias) e em 680 associada à presença de clorofila-a. A feição de espalhamento no início do infravermelho próximo também fica registrada, se deslocando para os comprimentos de onda mais longos com o aumento da concentração de clorofila-a na água seguindo mais uma vez os dados obtidos por Londe (2008).

Esse mesmo comportamento se repete na Figura 6.5-B, entretanto com feições mais marcantes devido à maior concentração de clorofila-a. Nela pode ser observado também um aumento da reflectância em aproximadamente 820nm associado ao aumento da concentração de clorofila-a e, por conseguinte, um comportamento cada vez mais próximo do que é esperado para uma vegetação terrestre.



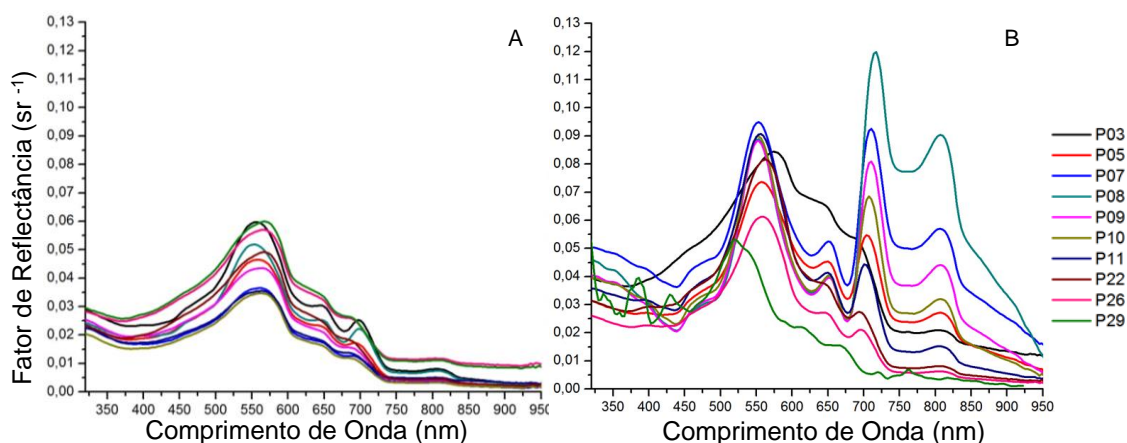


Figura 6.6: Curvas espectrais do Fator de Reflectância para: (A) Maio; (B) Setembro.

Uma análise das Figura 6.5 e 6.6 mostra curvas espectrais distintas para  $R_{sr}$  e FR em Setembro. Em Maio o formato dos espectros é aproximadamente o mesmo, divergindo em magnitude devido à natureza física desses dois parâmetros (ver Equação 3.6 referente ao FR e Equação 3.17 referente à  $R_{sr}$ ). Entretanto em Setembro os espectros divergem em sua forma e magnitude. Isso pode ser explicado, pois em muitos pontos havia a presença do que é referido na literatura como *scum* (SUBRAMANIAM et al., 1999), que é uma concentração maior das células fitoplanctônicas na interface água/ar que faz com que o FR desses pontos espectrais tenha um comportamento próximo ao comportamento de uma vegetação terrestre.

### 6.1.2 Análise pontual

Esta seção foi dedicada à análise e interpretação dos dados limnológicos e espectrais obtidos em alguns dos pontos amostrais analisados para as duas campanhas de campo. Optou-se pela análise dos pontos mais didáticos e extremos: o ponto três, oito e vinte e seis mostrados na Figura 5.15. O restante dos dados dos 10 pontos amostrais está contido no APÊNDICE A.

#### 6.1.2.1 Ponto amostral 03

As características gerais, para as duas campanhas, do ponto amostral de número três, localizado no braço de entrada do rio Paraíba do Sul (Figura

5.15), são apresentadas na Tabela 6-2. Observa-se que há uma diminuição da concentração de clorofila-*a*, e um aumento na concentração de sedimentos em suspensão e carbono dissolvido entre campanhas. É interessante atentar ainda para a redução de sete metros na profundidade deste local.

Tabela 6-2: Características gerais do ponto amostral 03.

Onde: Chl-*a* é a clorofila-*a*; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 03			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
Chl- <i>a</i>	µg.L <sup>-1</sup>	16,2	4,4
Feo		2,2	1,0
MSI		0,6	4,0
MSO		2,8	2,7
MST	mg.L <sup>-1</sup>	3,4	6,7
CID		3,4	4,3
COD		2,5	2,6
CTD		5,9	6,9
Profundidade		14,0	7,0
Disco de Secchi	m	1,9	1,1
O <sub>2</sub>	%	97,8	83,9
pH		7,13	6,76
Turbidez	NTU	7,1	11,5
Horário de aquisição	Horário de Brasília	11:20	11:00

A Figura 6.7 mostra os dados de Irradiância Descendente (E<sub>d</sub>) na coluna d'água. Há uma redução de 2 metros na profundidade limite da zona eufótica

em Setembro. Isso decorre do aumento da turbidez apesar de em setembro haver maior disponibilidade energética como pode ser notado pela comparação das curvas de superfície entre a Figura 6.7-A e Figura 6.7-B .

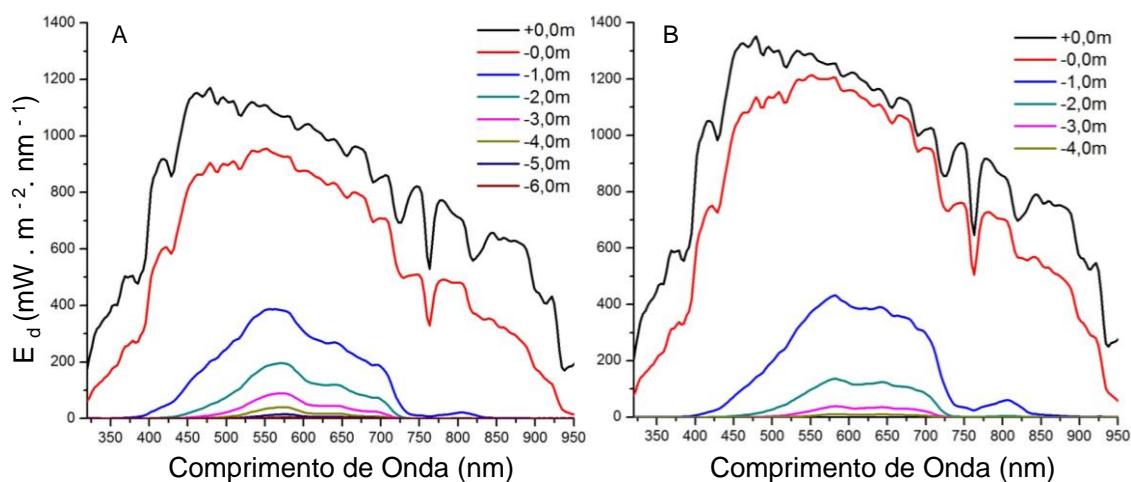


Figura 6.7: Irradiância Descendente para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

As irradiâncias descendentes na Figura 6.7 não estão normalizadas, por isso a comparação entre campanhas fica dificultada. Em Setembro, apesar da redução da zona eufótica, a irradiância em dois metros de profundidade é similar em magnitude àquela de Maio. Isto ocorre devido às diferenças de sazonalidade entre campanhas: havia mais luz em Setembro do que em Maio. Observa-se que o valor de  $E_d$  em superfície em Maio é de próximo de  $1200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$  na região por volta de  $450 \text{ nm}$ , mas em Setembro esse fator chega próximo à  $1400 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$  no mesmo comprimento de onda.

Entretanto, em profundidade a forma do espectro foi alterada. A dois metros de profundidade, em Maio tem-se um máximo de irradiância em aproximadamente  $560 \text{ nm}$  com uma queda deste sinal na região do azul e dos comprimentos de onda mais longos (vermelho e infravermelho próximo). Já em Setembro, devido ao aumento da turbidez, o espectro forma um patamar na região do verde e do vermelho do espectro. Além disso, no primeiro metro houve em Maio uma perda de aproximadamente  $600 \text{ mWm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ ; já em Setembro a perda foi maior,  $900 \text{ mWm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ . Essa alta perda energética em setembro se dá principalmente

devido ao aumento da turbidez seguindo o aumento de sedimentos em suspensão para este ponto de coleta.

Na Figura 6.8 é mostrado o perfil da Radiância ascendente espectral ( $L_u$ ). Nela fica evidente a dominância do verde na cor da água em ambas as campanhas. Porém, o pico no verde é mais definido na Figura 6.8-A do que na Figura 6.8-B, onde o pico continua centrado no verde, mas é menos acentuado, sofrendo a influência da presença de sedimentos em suspensão. Devido a essa influência ainda, a feição de absorção da clorofila-*a* (aproximadamente 680nm) e a da ficocianina (aproximadamente 620nm), evidentes em Maio (Figura 6.8-A), são mascaradas em Setembro (Figura 6.8-B).

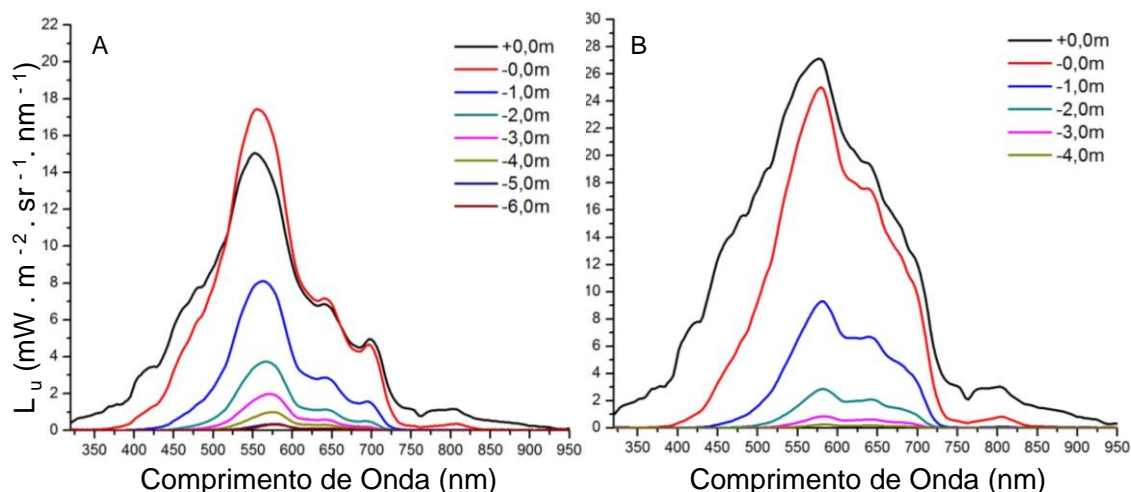


Figura 6.8: Radiância ascendente para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Além disso, na Figura 6.8-A, a curva de subsuperfície (-0m) supera o valor de superfície (+0m) na região do verde do espectro eletromagnético. O Dr. Curtis Mobley (comunicação pessoal) fez uma série de simulações usando o modelo numérico de transferência radiativa - Hydrolight <<http://www.sequoiasci.com/products/hl-radiative.cmsx>> e os dados *in situ* para explicar como isso seria possível. Ele levantou duas hipóteses:

1. O ângulo de elevação solar é baixo, ou seja, a medida foi realizada fora do intervalo das 9:00 às 15:00; ou

2. A taxa de retroespalhamento é alta.

A primeira hipótese decorre do fato de que, com ângulos de elevação solar baixos, a radiação refletida na superfície da água que entra no campo de visão do sensor é menor, o que faria com que a  $L_u$  fosse menor na superfície com relação à subsuperfície.

A Figura 6.9 ilustra a primeira hipótese simulada por Mobley. Entretanto, ela não é cabível, pois, como visto na Tabela 6-2, os dados foram coletados às 11:20h em Maio e às 11:00 em Setembro.

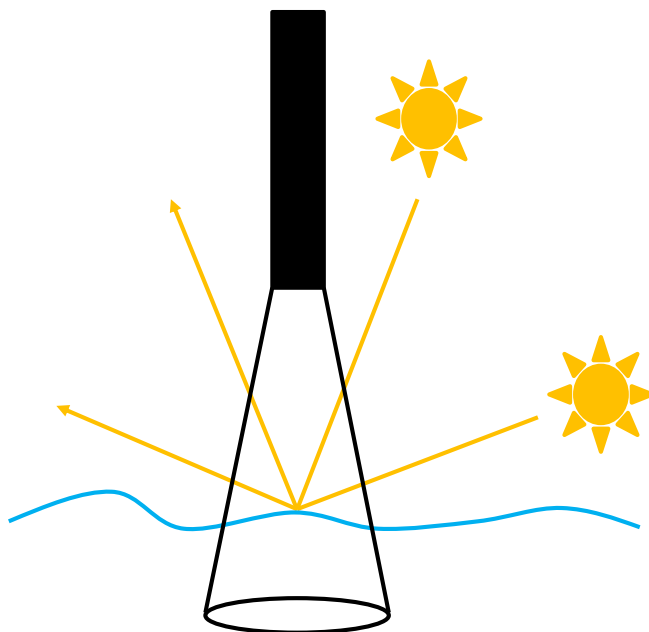


Figura 6.9: Ilustração da primeira hipótese referente ao ângulo de elevação solar e sua influência sobre a radiação que sensibiliza o sensor.

Referente à segunda hipótese, a taxa de retroespalhamento (Equação 6.1) que Mobley faz menção é a proporção do espalhamento total que retorna para o hemisfério de onde saiu, ou seja, quanto do espalhamento é para trás.

$$taxa = \frac{b_b}{b}$$

Equação 6.1

onde: *taxa* é a taxa de retroespalhamento;  $b_b$  é o retroespalhamento; e  $b$  é o espalhamento.

Em Maio há menos partículas na água o que faz com que esta seja menos turbida e, portanto, mais influenciada pelo comportamento da água pura, a qual apresenta espalhamento isotrópico. Já em Setembro a água possui mais partículas suspensas e, por conseguinte, maior turbidez. Isso influencia a proporção do retroespalhamento com relação ao espalhamento total, fazendo com que esta taxa seja menor. Uma taxa maior em Maio explicaria o porquê da curva de subsuperfície superar a de superfície na região do verde do espectro eletromagnético para esta campanha.

Outras hipóteses ainda devem ser analisadas:

1. A variação das condições de luminosidade local no período de aquisição; e
2. A lei de Snell.

A primeira hipótese leva em conta que, nos segundos transcorridos entre a realização da medida de superfície e a de subsuperfície pode haver variação de luminosidade local.

Se houver mais luz disponível quando realizada a medida de subsuperfície essa deverá superar a medida de superfície. Isso decorre da possível passagem de nuvens durante a aquisição dos espectros, as quais muitas vezes são imperceptíveis na superfície da Terra, mas podem ser significativas ao dado final.

A segunda hipótese é a chamada lei de Snell descrita na Equação 6.2. Essa lei permite prever como a luz irá se comportar quando passar de um meio para outro com diferentes índices de refração (FEYNMAN et al., 2008).

$$n_1 \cdot \text{sen} \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen} \theta_2$$

Equação 6.2

onde:  $n_1$  é o índice de refração do meio 1;  $\text{sen}\theta_1$  é o seno do ângulo de incidência no meio 1;  $n_2$  é o índice de refração do meio 2;  $\text{sen}\theta_2$  é o seno do ângulo refratado no meio 2.

Essa lei nos diz que se um feixe de luz, propagando-se no ar (índice de refração igual a 1) incidir na superfície da água (índice de refração igual a aproximadamente 1,33) com um ângulo qualquer igual a  $\theta_1$ , na água ele terá um ângulo refratado  $\theta_2$  menor do que aquele de incidência (Figura 6.10).

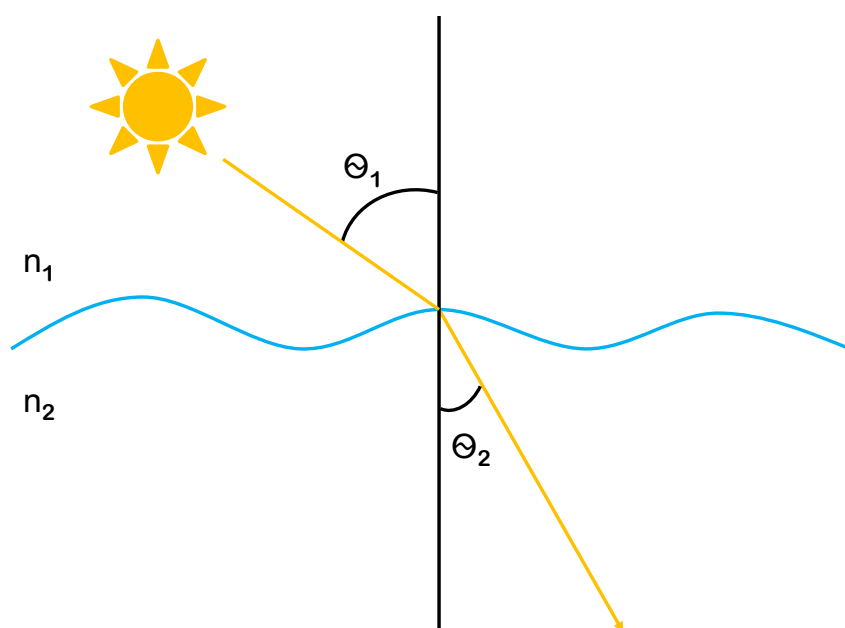


Figura 6.10: Esquema ilustrativo da Lei de Snell.

A implicação desta lei nesta pesquisa pode ser a diminuição do campo de visada do sensor como mostra a Figura 6.11. Fora da água o campo de visada do sensor seria menor que dentro da água. Com isso seria possível ter uma  $L_u$  dentro da água maior do que fora dela.

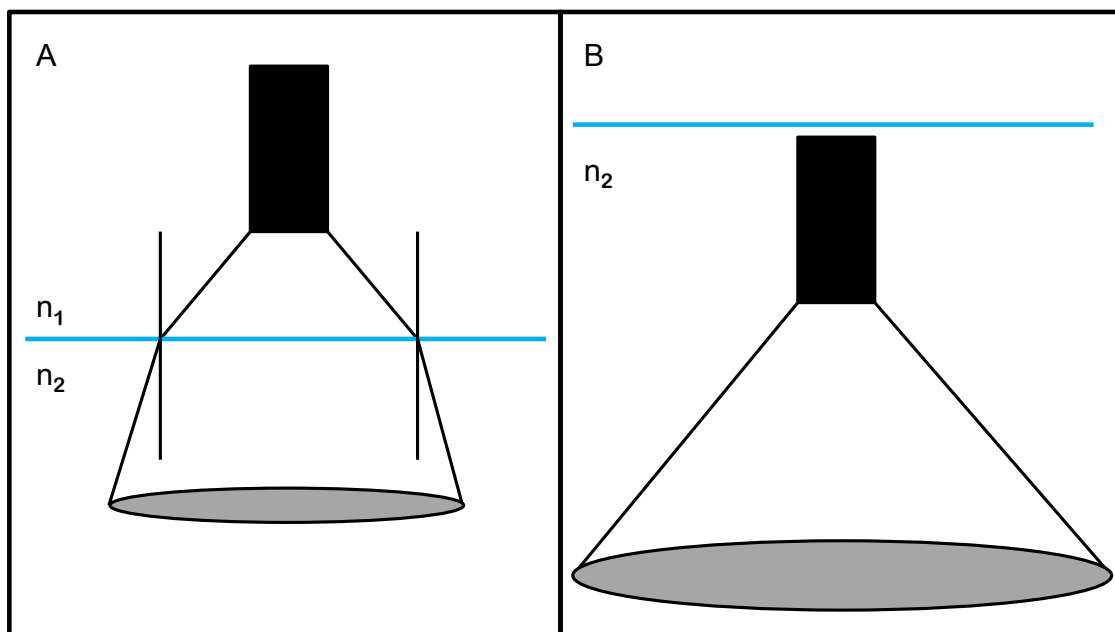


Figura 6.11: Implicações da Lei de Snell sobre o campo de visada do sensor. (A) Sensor fora da água; (B) Sensor dentro da água.

Entretanto isso seria válido para todos os pontos nas duas campanhas e, como mostra a Figura 6.11, essa interpretação sobre o campo de visada do sensor é viável para uma simplificação da realidade com a interface ar/água perfeitamente lisa, sem as perturbações decorrentes das ondas de superfície. Assim, em trabalhos *in situ* não é possível ter controle dessa variação no campo de visada no sensor com a presença de ondas.

Outra implicação da lei de Snell é que nem todo feixe de luz conseguirá sair do corpo d'água para sensibilizar o sensor devido mais uma vez a essa diferença no índice de refração entre os dois meios.

Outra variável que permite caracterizar o ponto amostral 03 nas duas campanhas é a  $R_{sr}$ . Analisando a Figura 6.12 é possível perceber que a  $R_{sr}$  foi maior em Setembro do que em Maio. O pico no verde em Maio se localiza por volta de 560nm, já em Setembro ocorre um deslocamento desse pico para os comprimentos de onda mais longos (580nm). Isso decorre da maior concentração de MST em Setembro. Pode-se perceber que os picos na região do vermelho não ficam definidos em Setembro devido à menor concentração



de Chl-a e também à presença de maior concentração de sedimentos suspensos que mascaram as feições da Chl-a.

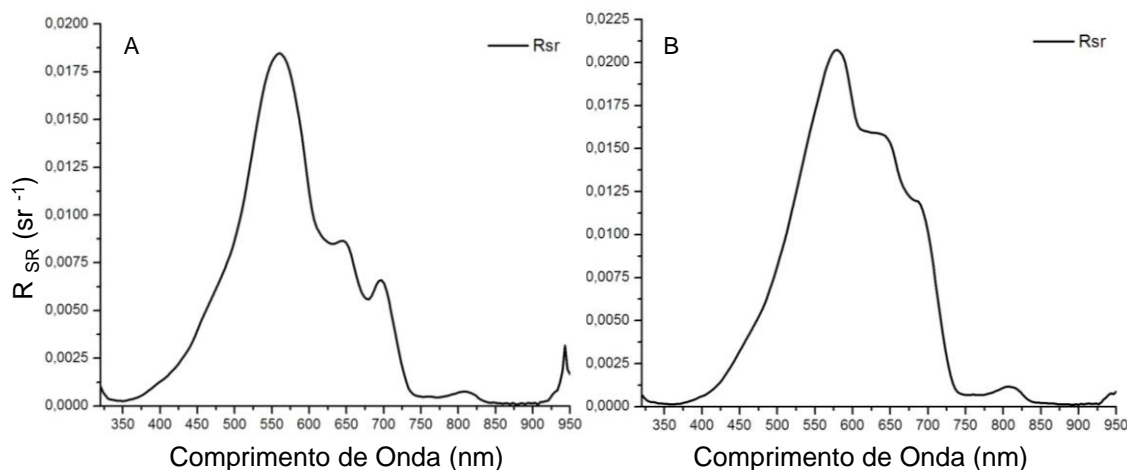


Figura 6.12: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

O fitoplâncton precisa de luz para fotossíntese, por isso este componente deve se concentrar nas camadas superiores da água, fazendo com que a absorção total na água seja maior nessa região e decaia, se mantendo aproximadamente constante em profundidade. Isso não ocorre nas Figuras 6.13-A, 6.14-A e 6.15-A. Percebe-se que os coeficientes totais espectrais de absorção, atenuação e espalhamento são maiores em seis metros (-6m) de profundidade, diminuindo de metro em metro até as camadas superficiais (-0m, -1m e -2m) que tem curvas praticamente iguais. Para as Figuras 6.13-B, 6.14-B e 6.15-B, a curva de quatro metros de profundidade (-4m, última camada medida devido à profundidade no mês de Setembro) também é maior do que as camadas mais superficiais.

Isso decorre do fato de que esse ponto se localiza na entrada do rio Paraíba do Sul. Provavelmente os dados de coeficiente de atenuação e absorção medidos com o AC-s estão captando a presença de uma corrente de fundo, causada pelo mergulho das águas do rio que são mais frias do que as do reservatório. Essa corrente de fundo pode levar à resuspensão da matéria orgânica

dissolvida contida nos sedimentos do fundo do reservatório. Esse fato causaria uma maior absorção no fundo que nas camadas superficiais.

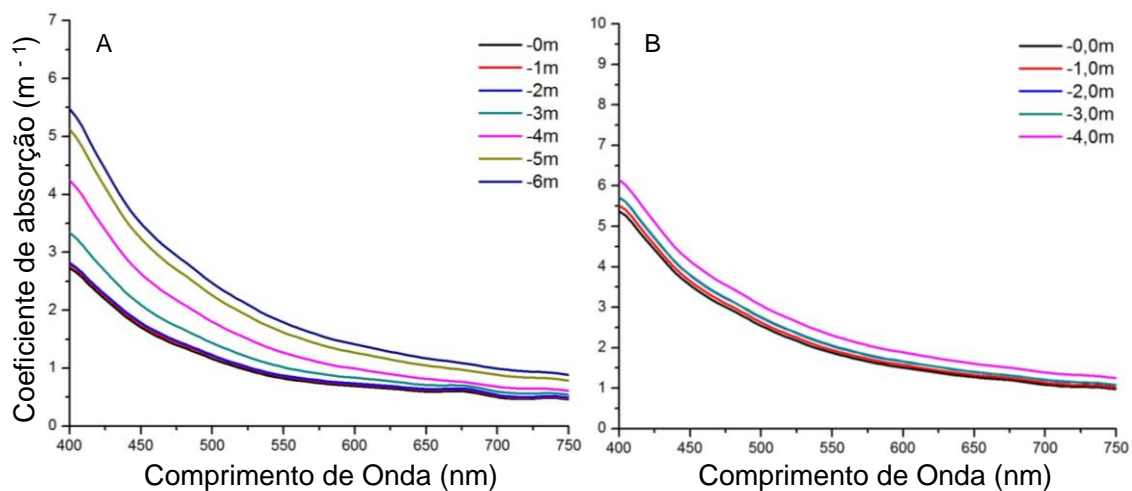


Figura 6.13: Coeficiente de absorção total para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

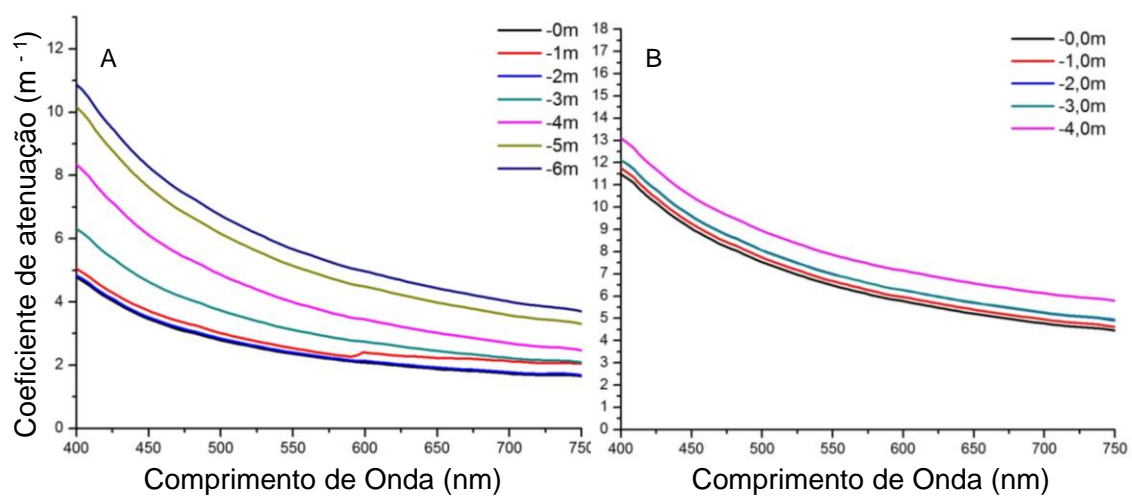


Figura 6.14: Coeficiente de atenuação para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

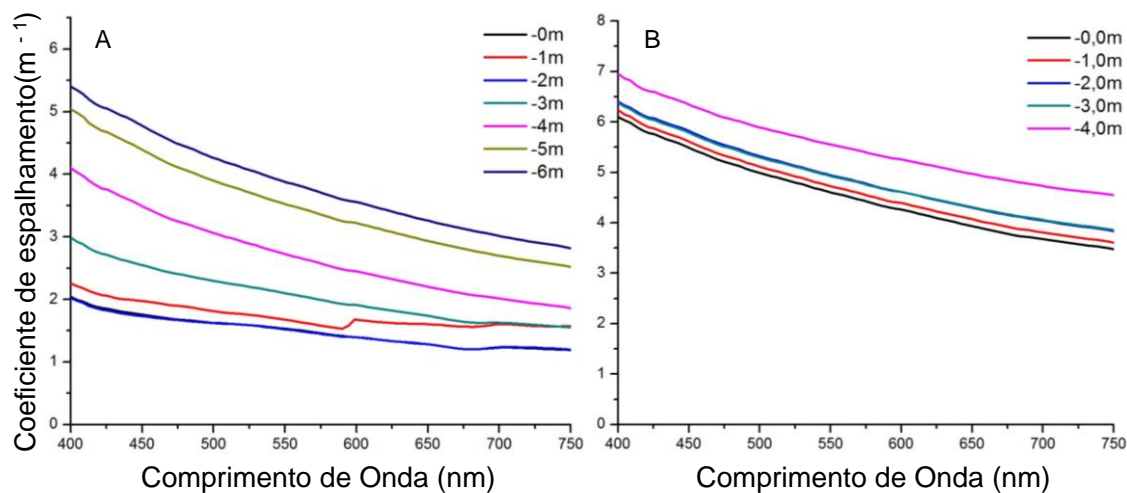


Figura 6.15: Coeficiente de espalhamento para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Como a água do rio tende a ser mais fria, oxigenada e turbida do que as do reservatório, para testar essa hipótese os dados de temperatura, oxigênio dissolvido e turbidez obtidos com a sonda limnológica foram plotados (Figura 6.16). Esses dados podem dar informações sobre a homogeneidade da coluna d'água. Apenas os dados de Maio foram plotados, pois em Setembro só se tem dados até 4 metros de profundidade.

Pela análise dos dados de temperatura da Figura 6.16 pode-se perceber um decaimento da temperatura em profundidade. Neste dia não é óbvia a percepção de uma corrente de fundo das águas frias do rio em decorrência da baixa temperatura ambiente. No horário de aquisição desses dados a temperatura do ar registrada na boia de monitoramento ambiental (SIMA: Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental – STECH et al., 2006) era de 15,5°C.

Na mesma figura (Figura 6.16), o gráfico de oxigênio dissolvido reafirma a hipótese de uma corrente de fundo, pois há um aumento do oxigênio dissolvido em profundidade, o que é o oposto do esperado para um ponto sem corrente de fundo. Além do perfil de oxigênio dissolvido, o perfil de turbidez na Figura 6.16 também auxilia essa interpretação: nota-se um aumento da turbidez em

profundidade, indicativo de revolvimento de fundo com resuspensão do material depositado.

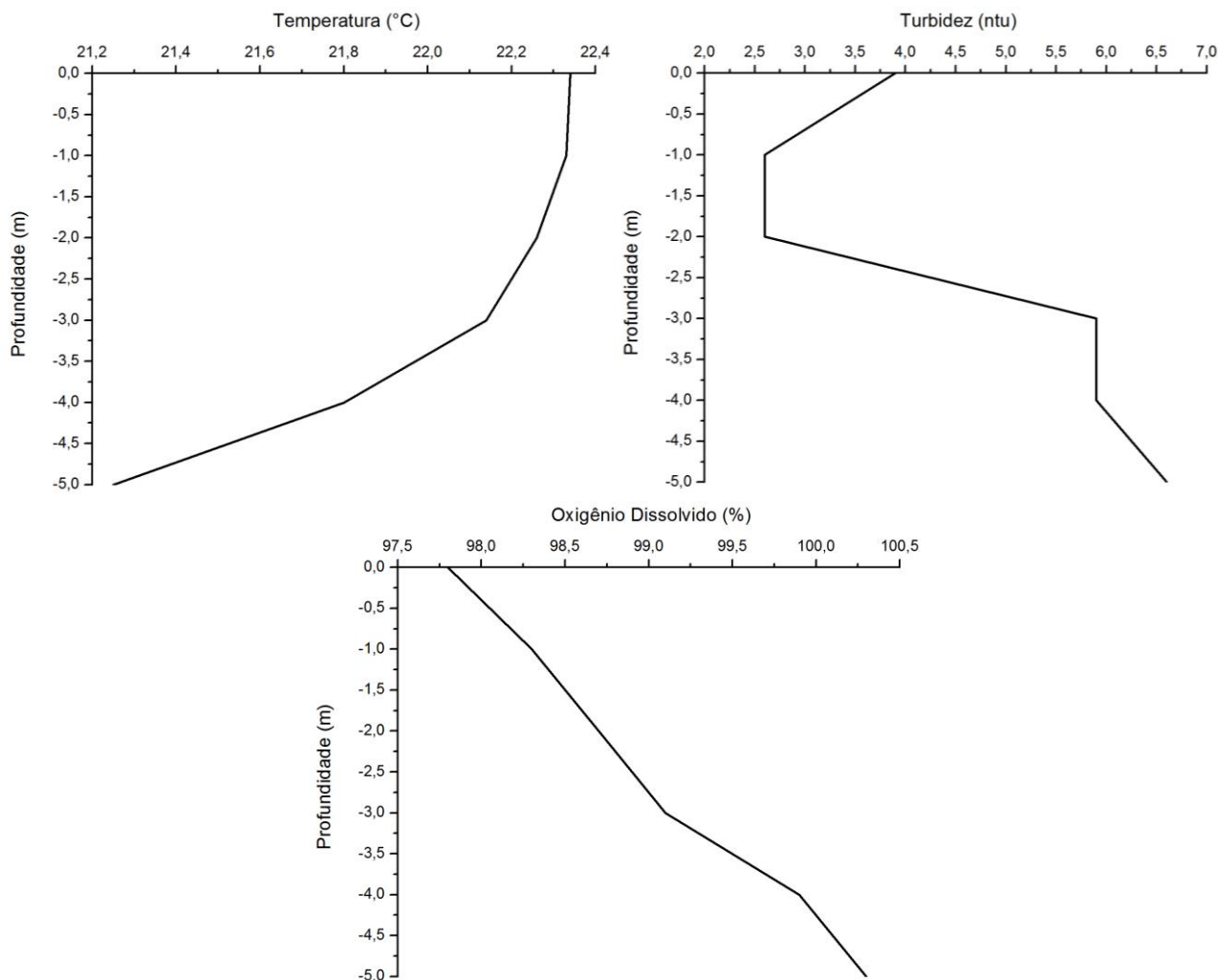


Figura 6.16: Dados Limnológicos da Sonda na coluna d'água do ponto 03 em Maio. Aqui vale lembrar que os dados plotados nas Figuras 6.13, 6.14 e 6.15, provenientes do AC-s são dados apenas dos componentes contidos na água (sem a contribuição da água pura) e sem a aplicação da correção pelo espalhamento mencionada anteriormente.

Sobre o coeficiente de atenuação difusa vertical, a Figura 6.17 nos mostra que em Maio a coluna d'água é menos homogênea em profundidade do que em Setembro. Os dados dessa figura corroboram com aqueles das Figuras 6.13, 6.14 e 6.15. É esperado que o  $K_d$  seja aproximadamente constante em

profundidade na faixa do visível do espectro eletromagnético (KIRK, 2011), o que não ocorre em Maio. Na Figura 6.18 fica evidente que o desvio padrão do  $K_d$  em Maio é maior que em Setembro. Isso reafirma a hipótese de uma coluna d'água não homogênea, decorrente provavelmente da corrente de fundo resuspendendo material depositado.

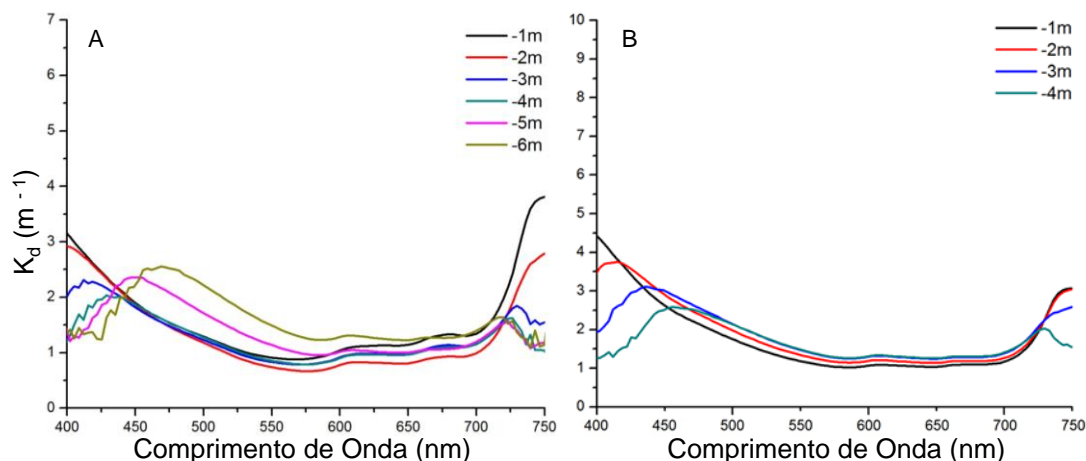


Figura 6.17: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Nas Figuras 6.17 e 6.18 pode-se perceber uma variação desordenada com um alto desvio padrão nas regiões do início do azul e infravermelho do espectro eletromagnético. Acredita-se que isso seja em decorrência da presença de ruído no sinal detectado remotamente pelo sensor RAMSES-ACC.

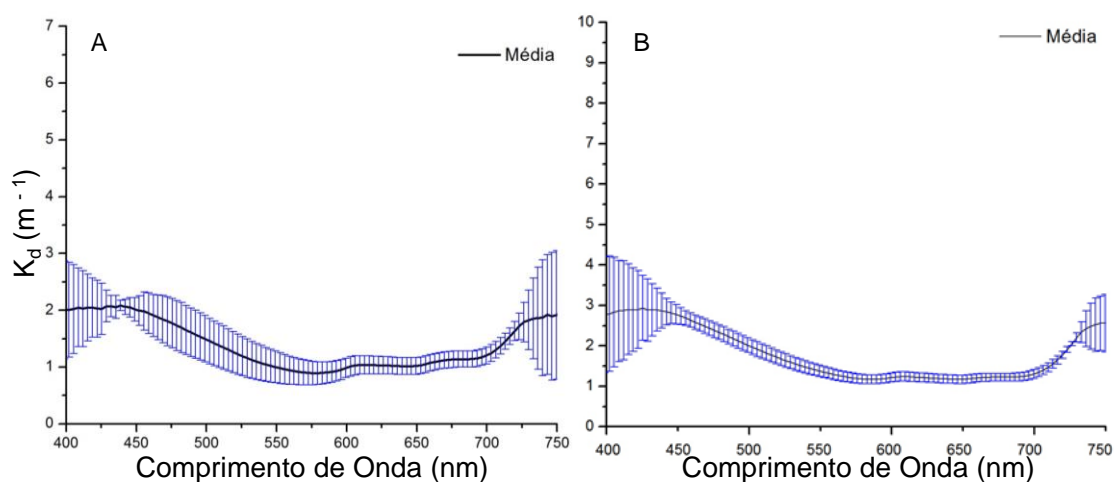


Figura 6.18: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Na Figura 6.19 pode ser observado o comportamento da zona eufótica nas duas campanhas de campo. Nota-se que houve uma ligeira queda na penetração da luz em Setembro (atentar para a diferença nas escalas do eixo Y da figura). Além disso, a seletividade espectral à penetração da luz também foi alterada entre as campanhas. Essa seletividade foi provavelmente alterada em decorrência da modificação dos componentes dominantes da água. Em Maio tem-se uma contribuição dominante do fitoplâncton sobre os processos de interação da luz com o meio aquático, mas em Setembro a dominância passa a ser do material em suspensão para este ponto de coleta. Essa mudança entre os componentes opticamente ativos dominantes faz com que a penetração da luz se altere espectralmente.

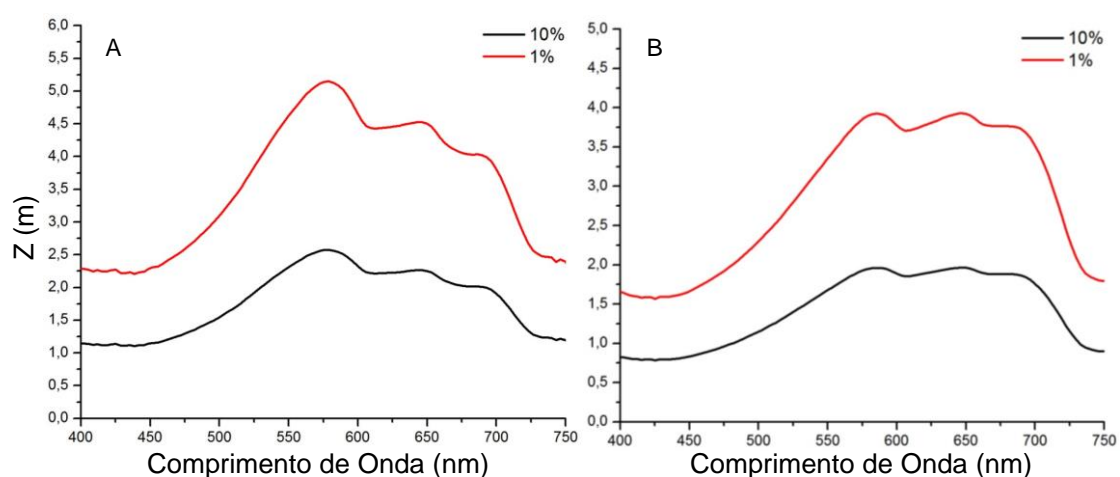


Figura 6.19: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

#### 6.1.2.2 Ponto amostral 08

As características gerais, para as duas campanhas, do ponto amostral de número oito, são apresentadas na Tabela 6-3. Observa-se que há um aumento significativo na concentração de clorofila-a, acompanhado por outro aumento na concentração de sedimentos em suspensão e carbono dissolvido entre campanhas.

Tabela 6-3: Características gerais do ponto amostral 08.

Onde: Chl-a é a clorofila-a; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 08			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
[Chl-a]	µg.L <sup>-1</sup>	18	306
[Feo]		0,2	11,5
[MSI]		0,5	8,0
[MSO]		4,0	56,0
[MST]	mg.L <sup>-1</sup>	4,5	64,0
[CID]		3,5	6,4
[COD]		2,2	1
[CDT]		5,7	7,4
Profundidade	m	12,7	8,1
Secchi		2,2	0,4
O <sub>2</sub>	%	98,9	145,4
pH		7,16	9,51
Turbidez	ntu	5,6	135
Horário de aquisição	Horário de Brasília	13:26	13:23

A Figura 6.20 mostra os dados de Irradiância Descendente ( $E_d$ ) na coluna d'água. Pode-se perceber que o aumento da concentração dos componentes opticamente ativos na água resultou numa redução de 7 metros na profundidade da zona eufótica de Maio para Setembro, devido ao aumento da turbidez que dificulta a penetração da luz.

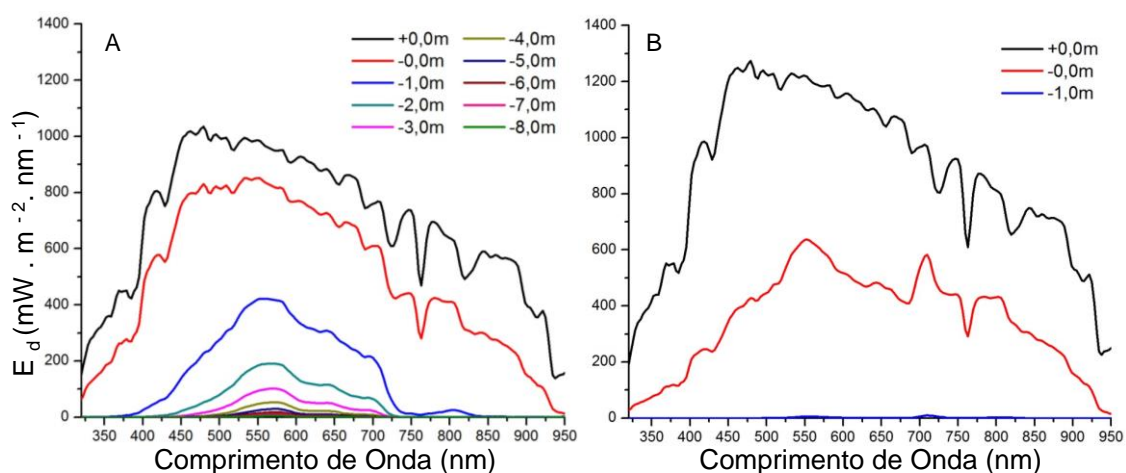


Figura 6.20: Irradiância Descendente para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Assim como no ponto amostral três, as irradiâncias descendentes na Figura 6.20 não estão normalizadas. Observa-se que o valor de  $E_d$  em superfície em Maio é de próximo de  $1000 \text{ mW.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$  na região por volta de  $450\text{nm}$ , mas em Setembro esse fator chega próximo à  $1300 \text{ mW.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$  no mesmo comprimento de onda.

Em profundidade a forma do espectro em Setembro foi bastante alterada já em subsuperfície e em um metro de coluna d'água a luz já representa 1% do valor de superfície. Essa alta perda energética em setembro se dá principalmente devido à alta concentração de clorofila-a e sedimentos na coluna.

Na Figura 6.21 é mostrado o perfil da Radiância Ascendente espectral ( $L_u$ ). Nela fica evidente o domínio do verde na cor da água para ambas as campanhas de campo. Nota-se ainda que o pico no verde é mais marcante em Setembro, sendo até superado por um segundo pico no início da região do infravermelho o que é característico de presença de *scum* (SUBRAMANIAM et al., 1999).



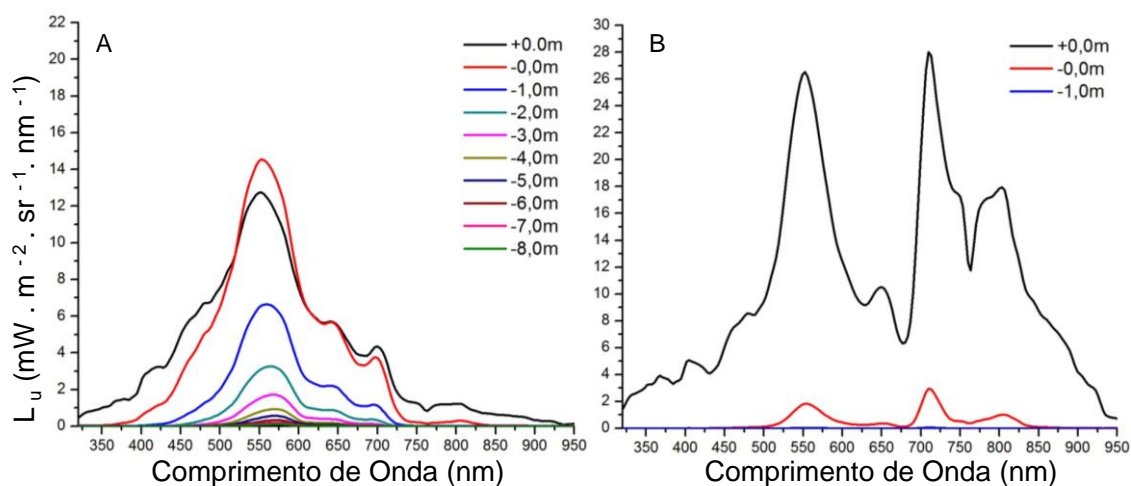


Figura 6.21: Radiância ascendente para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Acompanhando os resultados do ponto amostral três, na Figura 6.21 novamente a curva de subsuperfície (-0m) supera o valor de superfície (+0m) na região do verde do espectro eletromagnético, o que não se repete na Figura 6.21-B. As mesmas hipóteses levantadas para o ponto amostral três são cabíveis para o ponto amostral oito.

Outro parâmetro a ser analisado é a  $R_{sr}$ . Analisando a Figura 6.22 é possível perceber que a  $R_{sr}$  foi maior em Maio (Figura 6.22-A) do que em Setembro (Figura 6.22-B). O pico no verde em Maio se localiza por volta de 550nm, já em Setembro ele não é o mais significativo dos picos presentes no espectro. O pico no verde, por volta de 550nm ocorre, porém o pico no início do infravermelho, pouco depois de 700nm é mais marcante. Mais uma vez isso decorre do aumento da concentração de clorofila-a com a presença de *scum*, o que confere um comportamento próximo de vegetação à água.

Outro pico a ser analisado para este e outros pontos com elevada concentração de clorofila-a é aquele que ocorre em aproximadamente 820nm, associado a uma distribuição das células fitoplanctônicas de tal forma que estas apresentem comportamento espectral próximo ao de vegetação. A concentração de células é alta e estas ficam dispostas em coluna de uma

forma que o espalhamento da radiação eletromagnética se aproxima àquele de vegetação terrestre (LONDE, 2008).

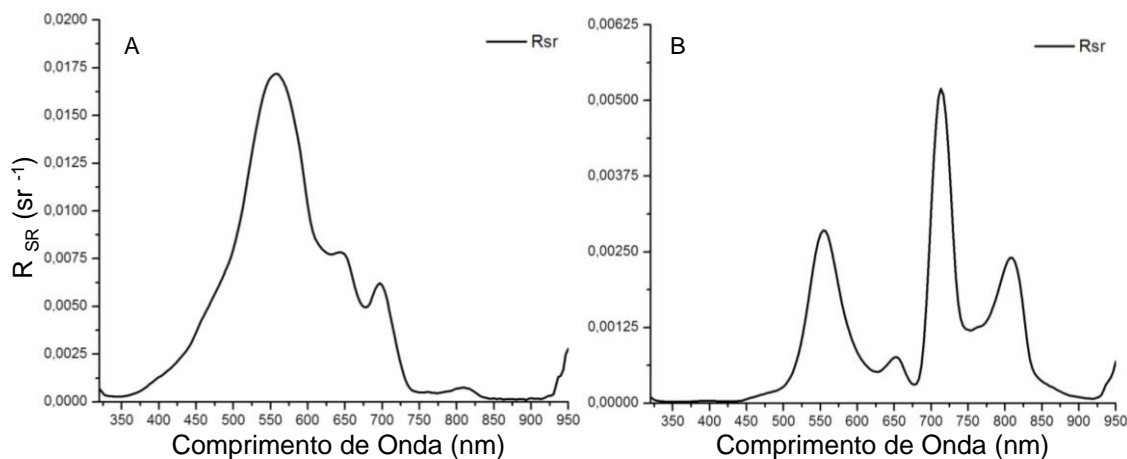


Figura 6.22: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Como dito anteriormente, o fitoplâncton precisa de luz para fotossíntese, por isso este componente concentra-se nas camadas superiores da água, fazendo com que a absorção total na água seja maior nessa região e decaia em profundidade. Isso fica evidente na análise da Figura 6.23-B. Em Setembro ficou evidente pelos dados de absorção do AC-s que havia uma maior concentração de fitoplâncton no primeiro metro da coluna d'água, decaindo em profundidade. O pico de absorção em 680 e o patamar em 620 ficaram evidentes para este ponto nesta campanha, o que não ocorreu para Maio.

Os espectros do coeficiente de atenuação (Figura 6.24) são funções tipicamente suaves, pois representam a taxa de decaimento do fluxo radiante. Já os espectros de absorção apresentam feições com dependências espectrais em decorrência da presença e concentração dos componentes opticamente ativos no meio aquático (Twardowski et al, 2001). Isto é possível devido à Equação 3.13 que mostra que o espectro da absorção é compensado pelo espectro do espalhamento resultando em uma curva espectral de atenuação suave.

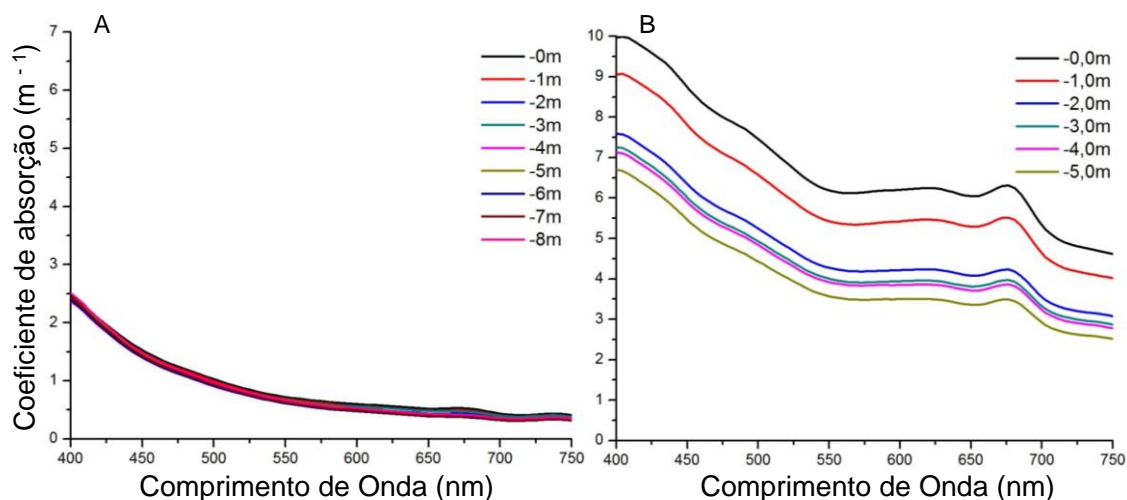


Figura 6.23: Coeficiente de absorção para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.

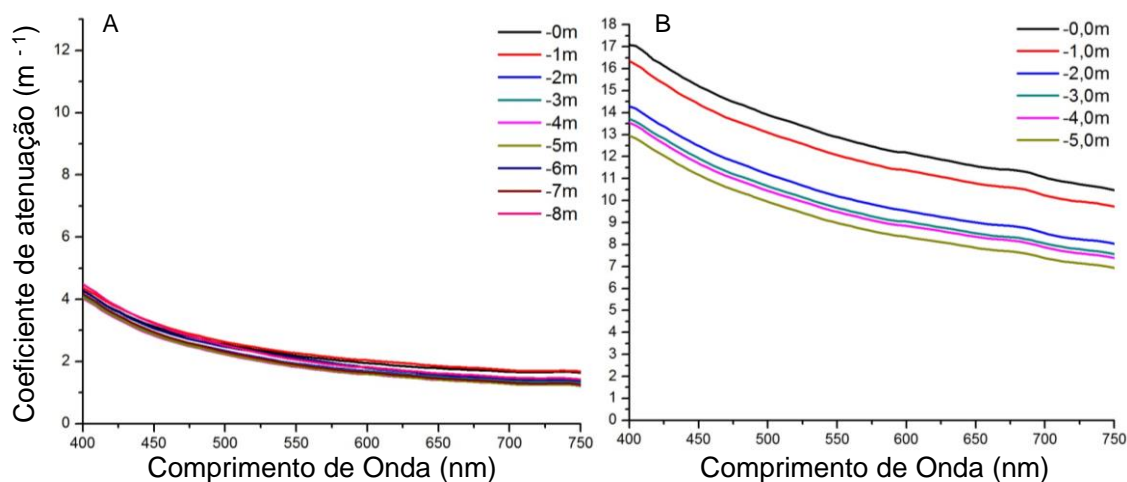


Figura 6.24: Coeficiente de atenuação para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Como era esperado pela Equação 3.13, a curva de espalhamento é então uma resposta direta à curva de absorção, com picos nos pontos de mínima absorção (550nm, por exemplo) e vales nos pontos de máxima absorção (aproximadamente 680nm, por exemplo). Entretanto esses picos e vales só foram evidentes na Figura 6.25-B, referente à campanha de Setembro. Isso ocorre devido à alta concentração de clorofila-a nesta campanha para este ponto de coleta.

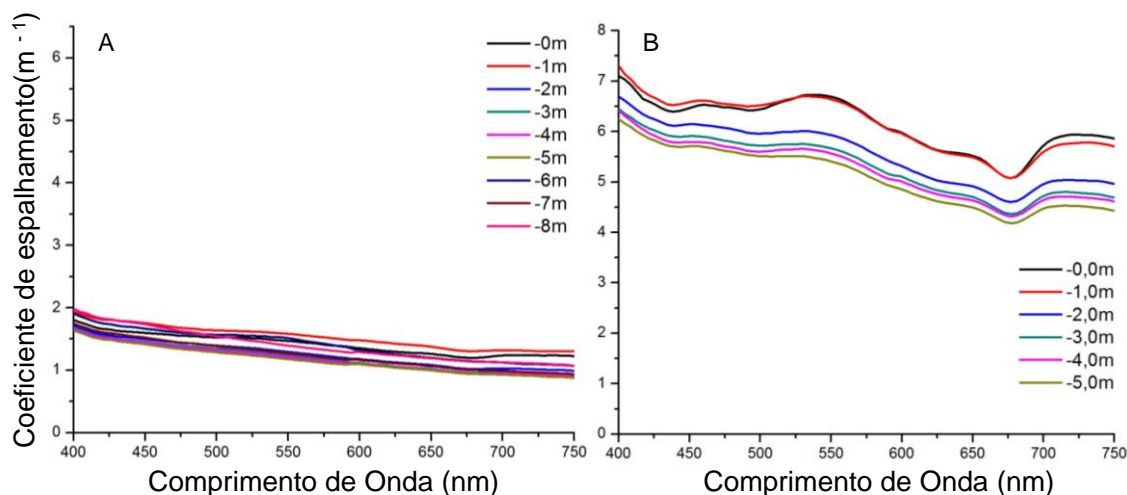


Figura 6.25: Coeficiente de espalhamento para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Sobre o coeficiente de atenuação difusa vertical, a Figura 6.26 nos mostra que em Maio a coluna d'água estava bastante homogênea em profundidade, o que é reafirmado pela Figura 6.27 onde é mostrado um baixo desvio padrão entre as curvas espectrais desse parâmetro.

Não é possível extrair alguma informação sobre esse dado para o mês de Setembro, pois os dados de  $E_d$  só foram coletados até 1 metro de profundidade. Entretanto, a análise da Figura 6.23 mostra a diferença espectral da absorção em profundidade para o mês de Setembro, o que já evidencia uma diferença de concentração dos componentes opticamente ativos em profundidade na coluna d'água desse ponto.

O que deve ser observado na Figura 6.26 é a diferença na forma espectral das curvas entre as campanhas de campo. O formato da curva de Setembro é substancialmente diferente daquelas de Maio. Em Setembro ocorrem feições acentuadas, o que não é observado para Maio.

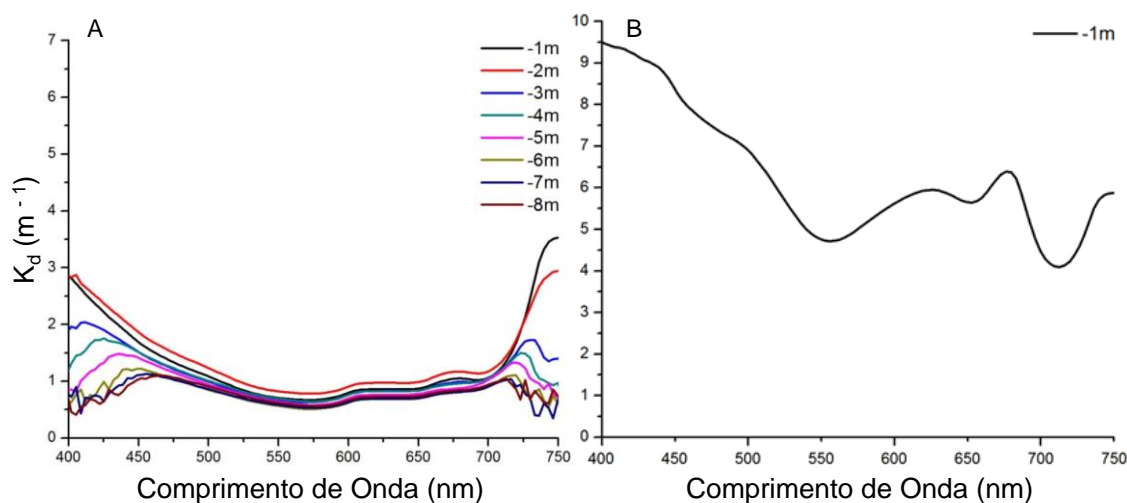


Figura 6.26: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.

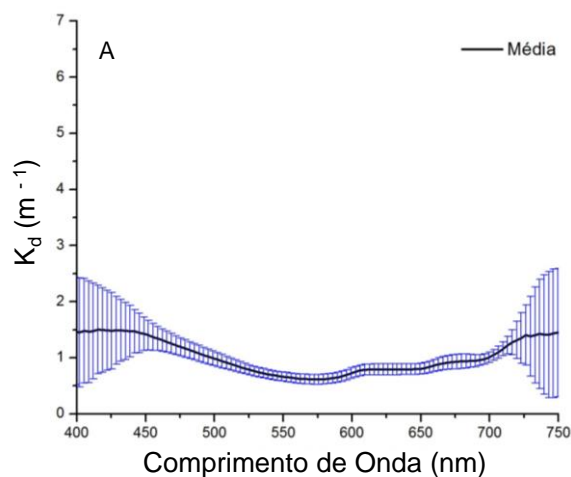


Figura 6.27: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 08 em Maio

Na Figura 6.28 pode ser observado o comportamento da zona eufótica nas duas campanhas de campo. Nota-se que houve uma brusca queda na penetração da luz em Setembro (atentar para a diferença nas escalas do eixo das ordenadas da figura). Houve também uma alteração na seletividade espectral à penetração da luz entre campanhas. Essa seletividade foi alterada em decorrência da variação da concentração dos componentes na coluna d'água. Em Maio tem-se que a luz é capaz de penetrar mais na região do

verde do espectro, pois essa é a região de maior espalhamento pelo fitoplâncton, o que aumenta o espalhamento frontal nessa região do espectro fazendo com que a luz penetre mais. Já em Setembro a região espectral que a luz consegue penetrar mais é no início do infravermelho, próximo a 710nm, isso decorre da concentração elevada de clorofila-a, que faz com que haja mais células fitoplanctônicas na coluna, o que leva a um maior espalhamento nessa faixa do espectro.

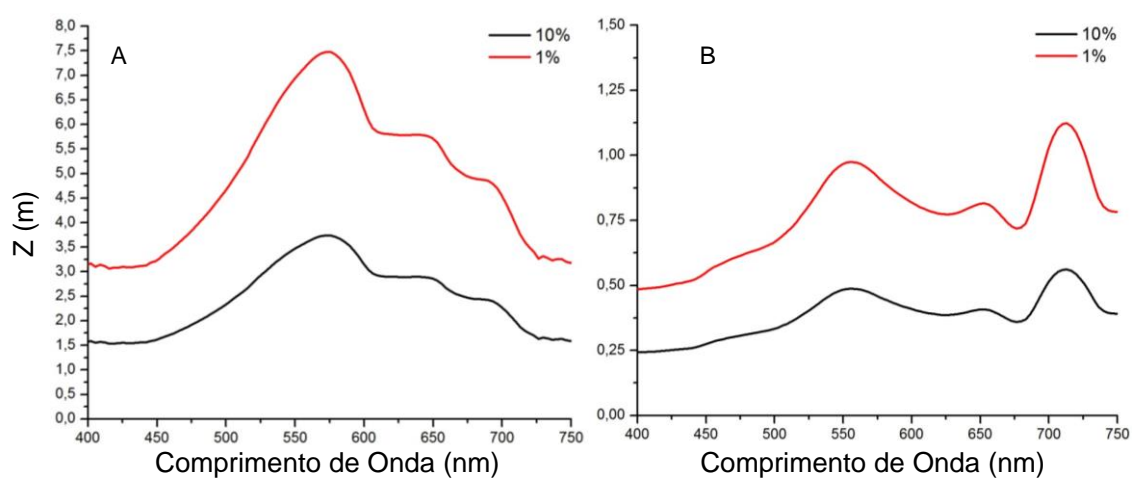


Figura 6.28: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.

### 6.1.2.3 Ponto amostral 26

A Tabela 6-4 mostra as características gerais, para as duas campanhas, do ponto amostral de número 26. Observa-se que há um aumento na concentração de clorofila-a, acompanhado pelo aumento na concentração de sedimentos em suspensão e carbono dissolvido entre Maio e Setembro.

Tabela 6-4: Características gerais do ponto amostral 26.

Onde: Chl-a é a clorofila-a; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 26			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
[Chl-a]	µg.L <sup>-1</sup>	3,4	14,8
[Feo]		1,6	0,8
[MSI]		0,5	0,9
[MSO]		1	3,4
[MST]	mg.L <sup>-1</sup>	1,5	4,3
[CID]		3,5	3,9
[COD]		2,6	4,1
[CDT]		6,1	8
Profundidade	m	48,9	50
Secchi		2,8	2
O <sub>2</sub>	%	93,6	113
pH		6,77	8,7
Turbidez	ntu	2,2	5
Horário de aquisição	Horário de Brasília	13:11	11:52

A Figura 6.29 mostra os dados de Irradiância Descendente ( $E_d$ ) na coluna d'água para este ponto amostral. Percebe-se que o aumento da concentração dos componentes opticamente ativos não causou redução na zona eufótica. Provavelmente isso decorre da distribuição dos componentes na coluna.

Assim como nos pontos amostrais três e oito, as irradiâncias descendentes na Figura 6.29 não estão normalizadas. Note que o valor de  $E_d$  em superfície em Maio é de próximo de  $1100 \text{ mW.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$  na região por volta de 450nm, mas

em Setembro essa fator chega próximo à  $1400 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$  no mesmo comprimento de onda. Em profundidade a forma do espectro é bastante semelhante nas duas campanhas apenas ficando um pouco mais evidente o pico no verde associado à presença de fitoplâncton.

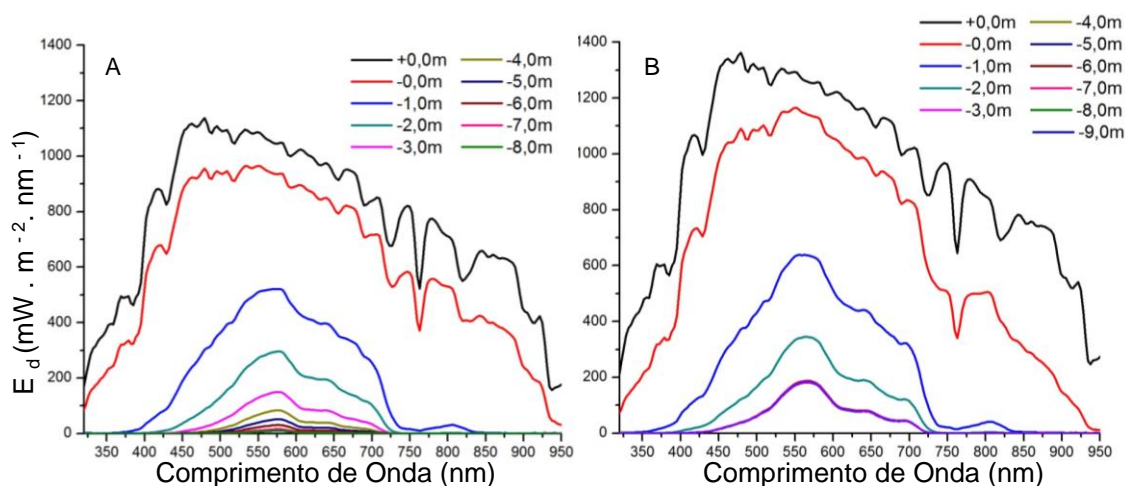


Figura 6.29: Irradiância Descendente para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Na Figura 6.30 é mostrado o perfil da Radiância ascendente espectral ( $L_u$ ). Nela fica evidente o domínio do verde na cor da água para ambas as campanhas de campo. Observa-se que os picos secundários associados à presença de fitoplâncton ficam mais evidentes em Setembro devido ao aumento na concentração de clorofila-*a*.

Acompanhando os resultados dos pontos amostrais três e oito, novamente a curva de subsuperfície (-0m) supera o valor de superfície (+0m) na região do verde do espectro eletromagnético. Neste caso isso ocorreu para ambas as campanhas de campo (Figura 6.30-A e 6.30-B). As mesmas hipóteses levantadas para o ponto amostral três são cabíveis agora para o ponto amostral 26.



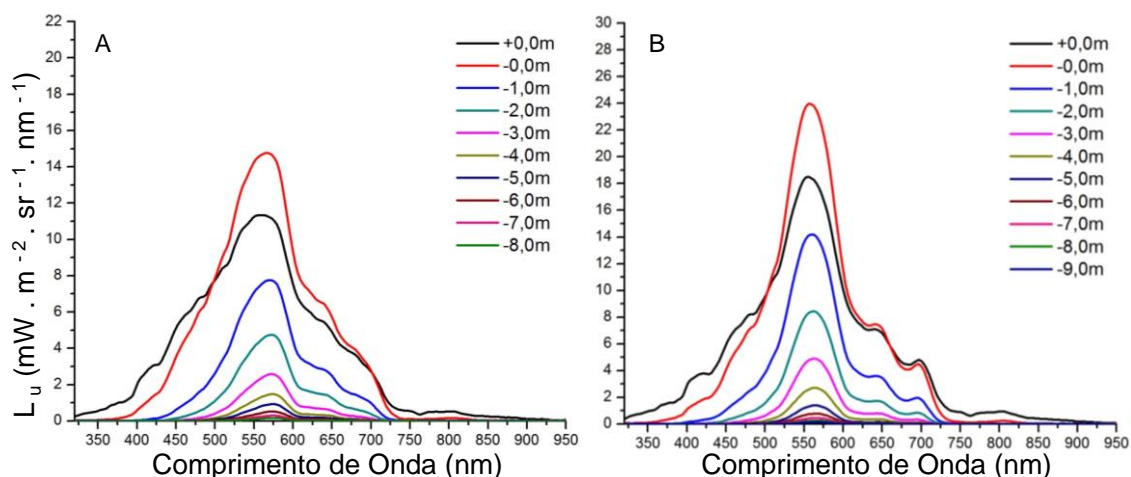


Figura 6.30: Radiância ascendente para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Analisando agora a  $R_{sr}$  pela Figura 6.31 é possível perceber que esta foi maior em Setembro do que em Maio. O pico na região do verde do espectro é igualmente posicionado em ambas as campanhas por volta de 560nm. Em Setembro esse pico é mais marcante do que em Maio e, além disso, os picos secundários na região do vermelho referentes à presença de fitoplâncton ficaram mascarados em Maio, mas não tanto em Setembro quando a concentração de clorofila-a é mais alta.

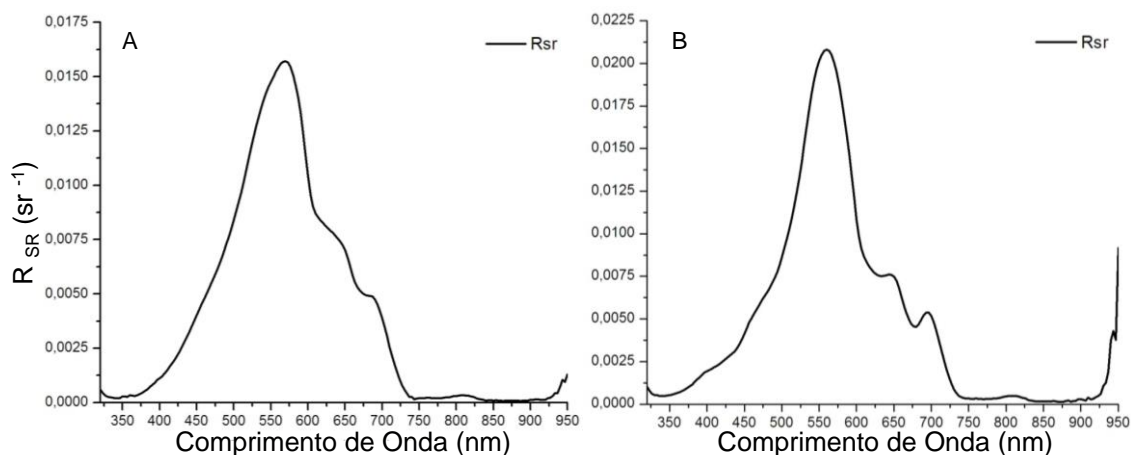


Figura 6.31: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

A Figura 6.32 mostra o coeficiente de absorção espectral total dos componentes opticamente ativos (sem a contribuição da água pura). Em

ambas as campanhas não foi possível identificar feições de absorção relativas à presença de clorofila-a. Neste ponto amostral nota-se uma grande homogeneidade na coluna d'água para ambas as campanhas realizadas, com coeficientes de absorção espectrais praticamente iguais em magnitude e forma.

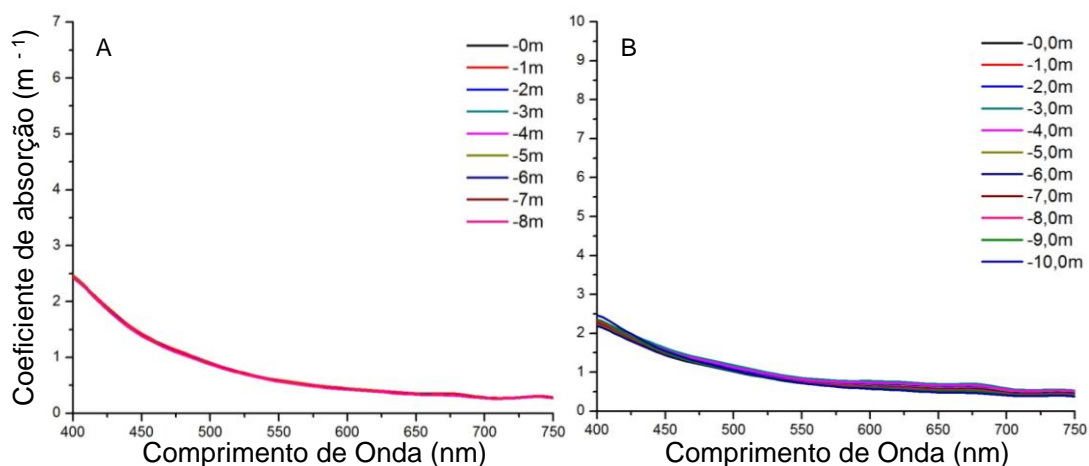


Figura 6.32: Coeficiente de absorção para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

O coeficiente de atenuação espectral total é mostrado na Figura 6.33 onde se observa um comportamento típico para este parâmetro: decaimento exponencial com magnitudes similares entre campanhas. O mesmo comportamento é mostrado na Figura 6.34 para o coeficiente de espalhamento espectral total onde se nota curvas levemente maiores na Figura 6.34-B com relação à Figura 6.34-A em resposta à maior concentração de clorofila-a.

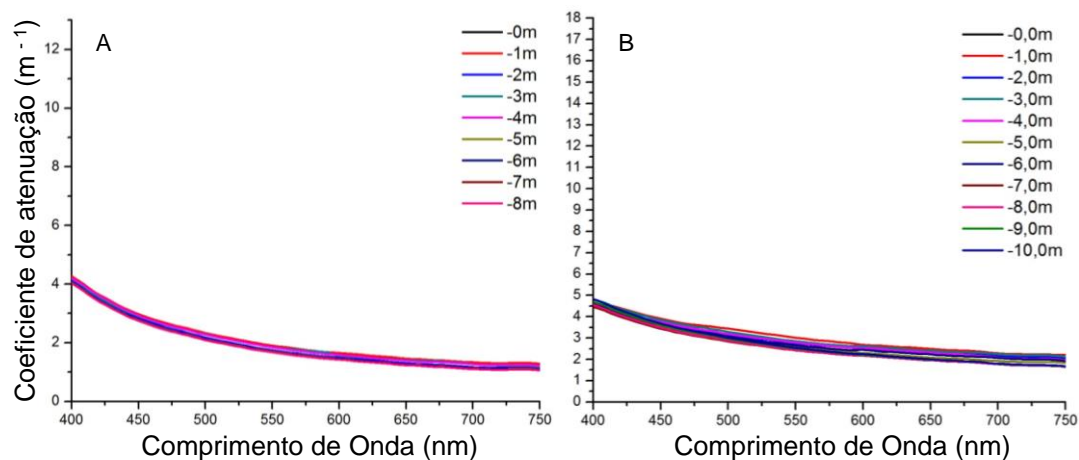


Figura 6.33: Coeficiente de atenuação para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

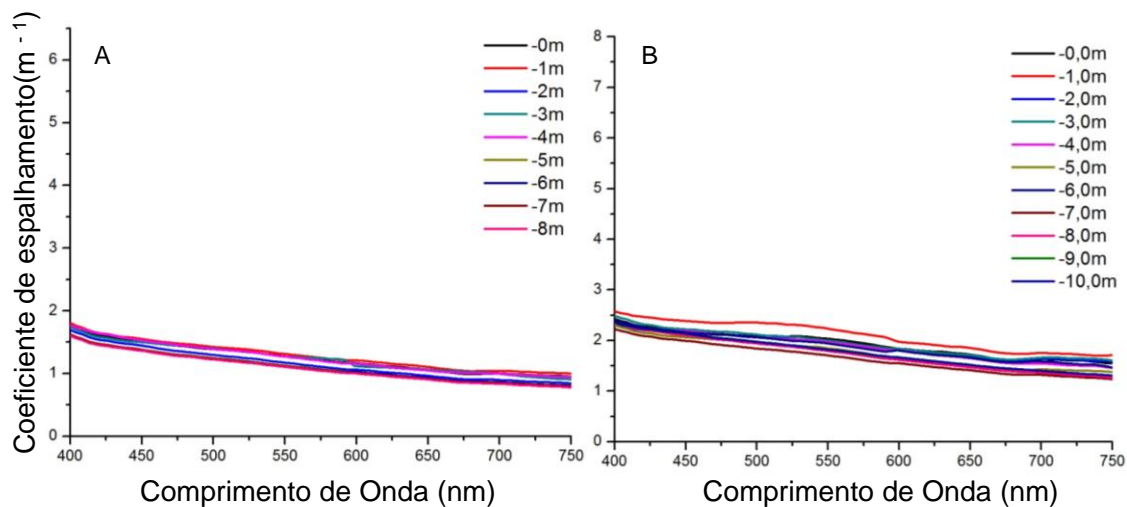


Figura 6.34: Coeficiente de espalhamento para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Sobre o coeficiente de atenuação difusa vertical, a Figura 6.35 mostra que em Maio e em Setembro a coluna d'água estava bastante homogênea em profundidade, o que é reafirmado pela Figura 6.36 onde é mostrado um baixo desvio padrão entre as curvas espectrais desse parâmetro para ambos os trabalhos de campo.

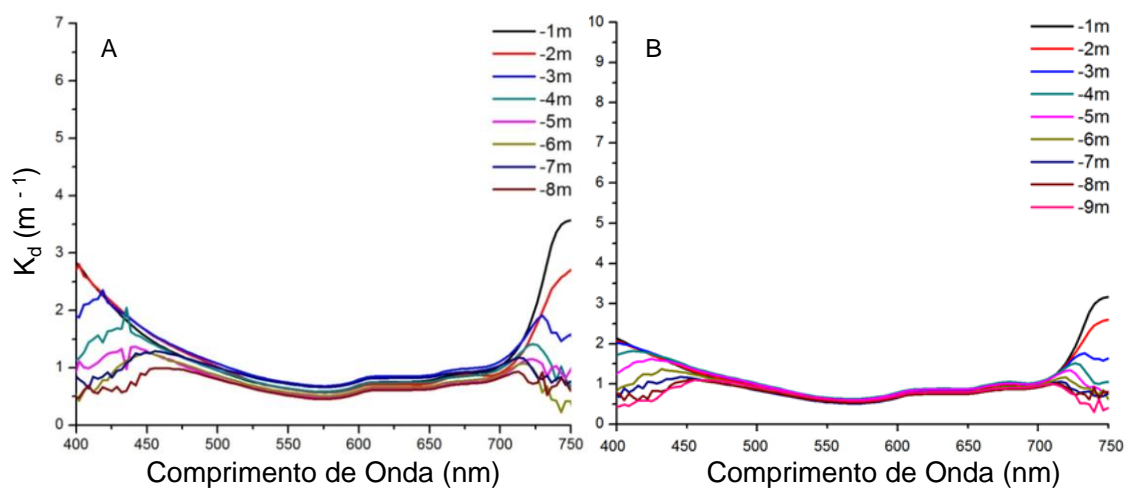


Figura 6.35: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

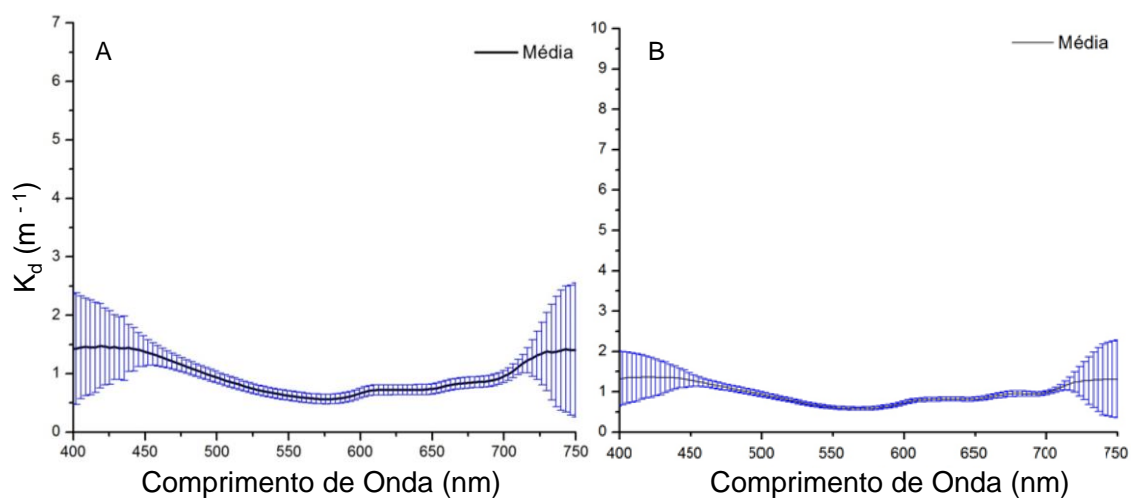


Figura 6.36: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Na Figura 6.37 pode ser observado o comportamento da zona eufótica nas duas campanhas. Nota-se uma grande similaridade na penetração da luz entre os trabalhos de campo sem uma significativa alteração na seletividade espectral à penetração da luz entre campanhas.

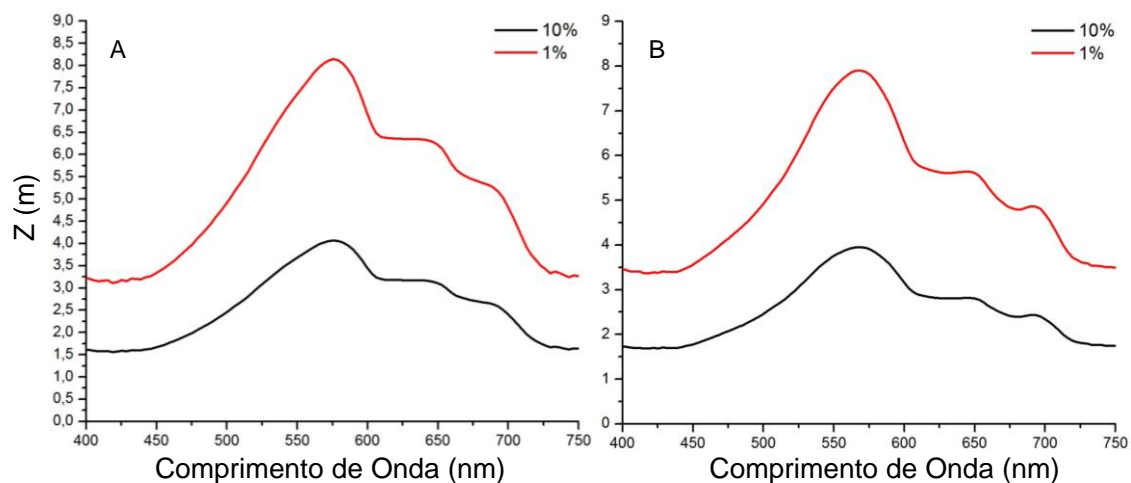


Figura 6.37: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

Os resultados mostrados para este ponto indicam que esta região do reservatório (Figura 5.15) teve maior estabilidade das propriedades ópticas e limnológicas, as quais se mantiveram com poucas alterações entre as etapas de campo.

## 6.2 Modelos ópticos

Nessa seção foram comparados o modelo de Gordon et al. (1988) para estimar a  $R_{sr}$  com a  $R_{sr}$  obtida a partir dos dados coletados com o uso dos sensores da TriOS.

### 6.2.1 Comparação entre campanhas

Inicialmente foi simulado o retroespalhamento pelo modelo de Gallagher (2004). Pôde-se perceber uma dependência do modelo à concentração de Material em Suspensão Inorgânico (MSI). Os dados dessa primeira simulação do retroespalhamento são mostrados na Figura 6.38.

Os pontos com maior concentração de MSI foram aqueles que apresentaram as curvas espectrais de maior magnitude nos valores de retroespalhamento: em Maio o ponto amostral sete, com  $8,1 \text{ mg.L}^{-1}$  de MSI; e em Setembro os pontos amostrais cinco, sete e oito com  $3,6$ ;  $3,0$ ; e  $8,0 \text{ mg.L}^{-1}$  de MSI respectivamente.

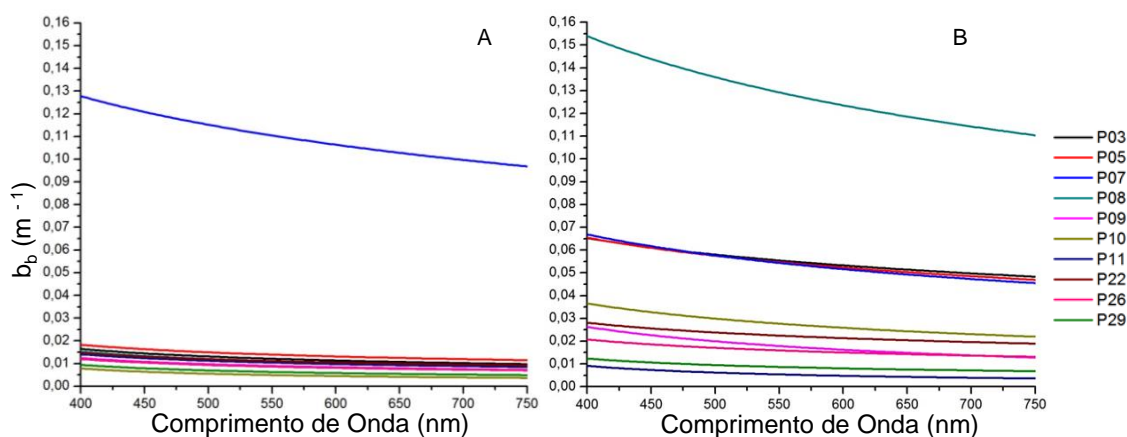


Figura 6.38: Curvas espectrais do Coeficiente de Retroespalhamento calculado pelo método de Gallagher (2004) para: (A) Maio; (B) Setembro.

Essa maior magnitude dos valores espectrais nos pontos de maior concentração de MSI decorre principalmente da própria equação do modelo de Gallagher (2004), Equação 3.30. Pela análise da equação, percebe-se que o modelo apresenta uma dependência inversa com a concentração de clorofila-a.

Isso significa dizer que um aumento da concentração de clorofila-a (como ocorre no campo de Setembro em muitos pontos) não provoca um aumento direto no retroespalhamento.

Outra observação a ser feita é que o retroespalhamento é diretamente proporcional à concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão. Isso decorre do fato de essa equação ter sido desenvolvida para águas estuarinas e costeiras, onde o componente majoritário sobre o sinal retroespalhado são os sedimentos inorgânicos em suspensão.

Em uma segunda etapa, foi simulado o coeficiente de retroespalhamento espectral pelo modelo de Jerome et al. (1996) enunciado na Equação 3.31. O resultado obtido é mostrado na Figura 6.39. Percebeu-se então que o modelo de Jerome et al. (1996) consegue captar a complexidade no retroespalhamento de águas do Caso 2, ou seja, consegue registrar as feições espectrais decorrentes da absorção pelos componentes da água. Por isso este modelo torna-se interessante para aplicação ao reservatório de Funil.

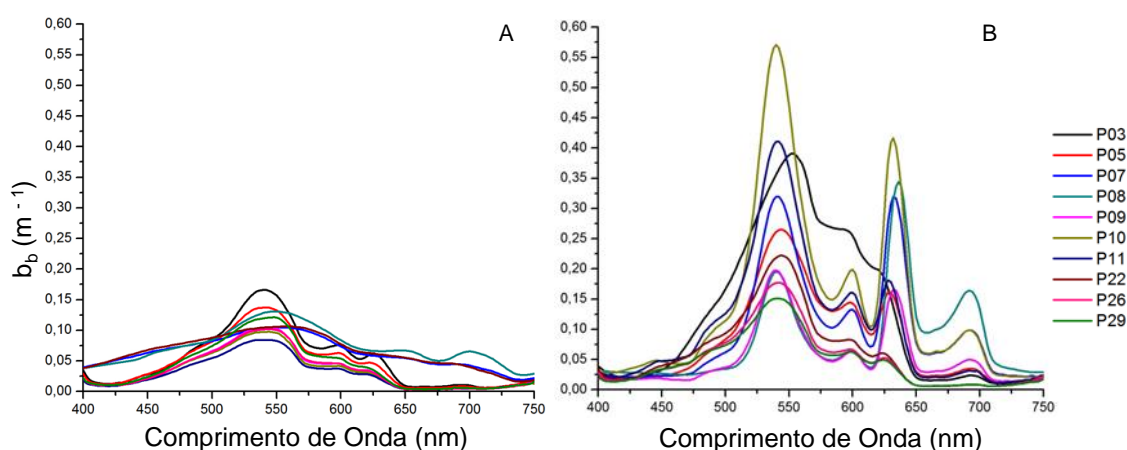


Figura 6.39: Curvas espectrais do Coeficiente de Retroespalhamento calculado pelo modelo de Jerome et al. (1996) para: (A) Maio; (B) Setembro.

Entretanto, como mostrado na Equação 3.31, esse modelo é função da  $R_{sr}$ , ou seja, na entrada do modelo de simulação está implícito um dado radiométrico medido em campo. Esta não é a situação ideal, entretanto, devido às dificuldades de se obter um coeficiente de retroespalhamento *in situ*, optou-se

por usar este modelo para ilustrar a complexidade do coeficiente de retroespalhamento em águas do Caso 2.

A Figura 6.40 é a comparação da  $R_{sr}$  simulada pelo uso do modelo de Gordon et al. (1988) com dados de retroespalhamento de Jerome et al. (1996) àquela obtida com os dados coletados em campo com os sensores da TriOS. Nesta figura observa-se onde a simulação erra mais, que são os valores onde a razão entre as  $R_{sr}$  se distancia de um. Isso ocorre nos extremos da faixa do espectro eletromagnético analisada.

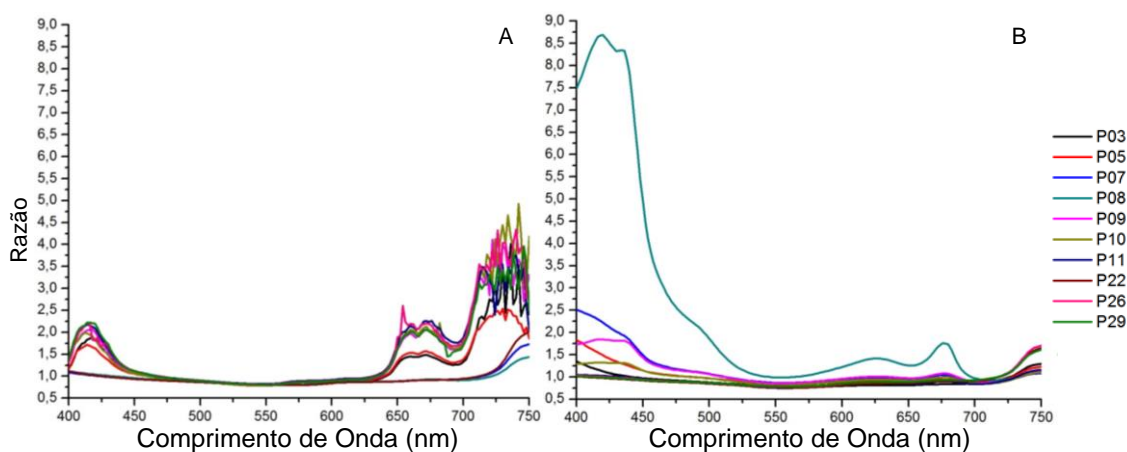


Figura 6.40: Curvas espectrais da razão entre a Reflectância de Sensoriamento Remoto obtida pelo modelo de Gordon et al. (1988) com coeficiente de retroespalhamento calculado pelo modelo de Jerome et al. (1996); pela Reflectância de Sensoriamento Remoto medida em campo com os sensores da TRIOS. Para: (A) Maio; (B) Setembro.

É importante deixar registrado que os dados de absorção que serviram de entrada para a simulação da  $R_{sr}$  são dados que não sofreram a correção pelo espalhamento. Isso implica dizer que o dado simulado de  $R_{sr}$  está subestimado, pois, como mostra a Equação 3.24 do modelo de Gordon et al. (1988), a absorção é um parâmetro que se encontra no divisor da fração.

Com relação ao modelo de simulação de  $R_{sr}$  com retroespalhamento medido pelo modelo de Gallagher (2004), optou-se por não plotar os dados da razão entre as  $R_{sr}$ , pois o dado simulado usando  $b_b$  de Gallagher (2004) é 10 vezes menor do que aquele obtido em campo.

Com os resultados obtidos nessa seção foi possível mostrar que a radiação que interage com o meio e é registrada por um sensor pode ser simulada a partir de modelos físicos que se baseiam nas propriedades ópticas inerentes. Ficou evidente que somente o estudo em profundidade dos modelos de simulação da  $R_{sf}$  tornará possível a inversão desses modelos de modo acurado, ou seja, só esse estudo tornará possível obter as características únicas do corpo d'água, as POIs, de maneira acurada a partir da radiação registrada por sensor em um satélite.



## 7. CONCLUSÕES

Esta pesquisa definiu como objetivos: caracterizar as propriedades ópticas de um ambiente com águas complexas do Caso 2; avaliar a variabilidade dessas propriedades em função das condições ambientais do meio; e testar modelos explanatórios da interação da luz com o meio aquático.

Foi possível observar condições ambientais distintas entre campanhas de campo, como ficou evidente pelas análises estatísticas e foi demonstrado pelos espectros emergentes da coluna d'água. Ficou claro que em Maio o reservatório pôde ser caracterizado com um comportamento espectral único, mas em Setembro isso não é possível, pois seria negligenciar a presença de massas d'água distintas com comportamentos espectrais diferentes em magnitude e forma, em resposta às mudanças nos parâmetros limnológicas.

Na etapa referente à modelagem da reflectância de sensoriamento remoto, pôde-se perceber que o modelo para o  $b_b$  de Gallagher (2004) não é adequado para águas complexas como no caso do reservatório de Funil. Essa limitação decorre do fato deste modelo ser destinado a aplicação em áreas costeiras e estuários, ou seja, águas cuja contribuição de sedimentos inorgânicos é marcante sobre o sinal registrado por sensores. Por esse motivo o modelo de Gordon et al. (1988), quando utilizado com o retroespalhamento proveniente do modelo de Gallagher (2004), tem uma assinatura característica de material em suspensão, o que mascara a contribuição da clorofila-*a*.

Já o modelo de Jerome et al. (1996) apesar de depender de dados coletados em campo, atingiu o objetivo central desta pesquisa: ele mostrou ser possível simular a  $R_{sr}$  com o modelo de Gordon et al. (1988) desenvolvido para águas do Caso1.

Sendo assim, a hipótese de que o modelo de simulação da  $R_{sr}$  a partir das POIs desenvolvido por Gordon et al. (1988) para águas do Caso 1 é aplicável a

águas complexas do Caso 2 foi aceita desde que se obtenham medidas acuradas das POIs.

## RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Foi possível perceber que existe a necessidade de evolução na determinação precisa das POIs em campo. As POIs são parâmetros únicos de resposta às condições do ambiente. Avanços nessas medidas embasam avanços em modelos que serão aplicados aos dados de plataformas orbitais. Portanto, avanços nessas medidas representam a evolução do monitoramento da qualidade da água por sensoriamento remoto.

Diante disso duas frentes principais de necessidades foram detectadas. A primeira é que atualmente não existem equipamentos disponíveis no mercado para aferir em campo o  $b_b$  espectral. Esse é um dos maiores desafios do sensoriamento remoto da cor da água no mundo, pois esse é o sinal que sensibilizará os sensores.

Outra frente se refere à correção dos dados provenientes do AC-S para uma condição de espalhamento múltiplo, e não apenas o *single-scattering* como são as correções disponíveis atualmente na literatura.

Além disso, durante o estudo que envolveu a realização dessa pesquisa, percebeu-se a necessidade de se medir as funções de espalhamento volumétrico para águas complexas como essa em prol de se ter uma noção do comportamento do espalhamento como um todo para este tipo de água. Presume-se que o resultado será bem diferente do que aquele de Petzold (1972) utilizado por Gordon et al. (1988) para o desenvolvimento de seu modelo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHEARN, D.; SHEIBLEY, R.; DAHLGREN, R.; ANDERSON, M.; JOHNSON, J. TATE, K. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology*, v. 313, p. 234-247, 2005.
- BABIN, M.; MOREL, A.; FOURNIER-SICRE, V.; FELL, F.; STRAMSKI, D. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration. *Limnology and Oceanography*, v. 48, n.2, p.843-859, 2003.
- BOBEDA, C. *Isolamento, purificação e caracterização de microcistinas (hepta-peptídeos tóxicos) encontrados em uma floração de Cianobactérias ocorrida no Reservatório do Funil*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1983.
- BUITEVELD, H. The optical properties of pure water. *Ocean Optics*, v. 2258, p. 174-183, 1994.
- BUKATA, R.; JEROME, J.; KONDRATYEV, K.; POZDNYAKOV, D. *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters*. N.W., EUA, Boca Raton: CRC Press, p. 362, 1995.
- COSTA, M. P.; NOVO, E. M.; TELMER, K. H. Spatial and temporal variability of light attenuation in large rivers of the Amazon. *Hydrobiologia*, v. 702, n. 1, p. 171-190, 2012.
- DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. A.; RUNDQUIST, D. C. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 1938, 2003, doi: 10.1029/2003GL018065.
- DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. *Applied Optics*, v. 44, n. 3, p. 412 – 422, 2005.
- FERREIRA, R. *Dados fluorométricos e espectrais aplicados à estimativa da concentração de clorofila na planície de Curuai / rio Amazonas*. São José dos Campos: INPE, 2012.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *Lições de Física de Feynman* Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2008.

FRY, E. Studies on some of the inherent optical properties of natural waters. *Applied Optics*, v. 52, n. 5, p.930-939, 2013.

FURNAS. *Sistema Furnas de Geração e TRansmissão*. Acesso em 28 de 02 de 2013, disponível em Furnas:

[http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina\\_hidr\\_funil.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funil.asp)

GALLAGHER, L. *Hyperspectral Remote Sensing of Suspended Minerals, Chlorophyll and Coloured Dissolved Organic Matter in Coastal and Inland Waters*. British Columbia, Canada: University of Victoria, 2004.

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

GORDON, H.; MOREL, A. *Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. A review*. New York, USA: Springer-Verlag, 1983.

GORDON, H.; BROWN, O.; EVANS, R.; BROWN, J.; SMITH, R.; BAKER, K. A Semianalytic Radiance Model of Ocean Color. *Journal of Geophysical Research*, v. 93, p. 10909-10924, 1988.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. *Programa Estadual de Investimentos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - RJ*. Diagnóstico Ambiental, Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA), Secretaria de Estado de Meio Ambiente, 1997.

HOOKER, S.; LAZIN, G.; ZIBORDI, G.; MCLEAN, S. An Evaluation of Above- and In-Water Methods for Determining Water-Leaving Radiances. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 19, p. 486-515, 2002.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). *Avaliação ambiental do Rio Paraíba do Sul*. Rio de Janeiro, 2010. Relatório Técnico.

INTERNATIONAL OCEAN COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG). *Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters*. Dartmouth, Canada: Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, 2000.

INTERNATIONAL OCEAN COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG). *Why ocean colour? The societal benefits of ocean-colour technology*. Dartmouth, Canada, 2008.

JERLOV, N. *Marine optics*. Elsevier Oceanography Series, 1976.

- JEROME, J.; BUKATA, R.; MILLER, J. Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural waters. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, p. 3135-3155, 1996.
- KAMPEL, M.; NOVO, E. O sensoriamento remoto da cor da água. In: R. B. Souza, *Oceanografia por satélites*. São Paulo: Oficina de textos, 2008.
- KIRK, J. T. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. New York, United States of America: Cambridge University Press, 2011.
- KUTSER, T.; PIERSON, D.; KALLIO, K.; REINART, A.; SOBEK, S. Mapping lake CDOM by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, v. 94, p. 535-540, 2005.
- LEE, Z.; CARDER, K.; ARNONE, R. A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, v. 41, n. 27, p. 5755-5772, 2002.
- LOBO, F. L. *Biblioteca espectral: determinação de espectros de referência para a classificação de tipos de água das áreas alagáveis da Amazônia*. 2009. 129 p. (INPE-15748-TDI/1493). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35ALGU2>>. Acesso em: 16 jul. 2013..
- LONDE, L. R. *Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – ibitinga (sp)*. versão: 2008-09-16. 223 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/08.18.12.14>>. Acesso em: 16 jul. 2013.
- MANTOVANI, J. E. *Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada*. 1993. 119 p. (INPE-5683-TDI/569). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.20.02.09.34>>. Acesso em: 16 jul. 2013.
- MANTOVANI, J. E.; NOVO, E. M. L. M. Comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. (SBSR), 1996, Salvador. *Anais...* São José dos Campos: INPE,

1996. p. 917-924. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5. (INPE-6164-PRE/2253). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.09.35>>. Acesso em: 16 jul. 2013.

MISHRA, S.; MISHRA, D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of. *Remote Sensing of Environment*, v. 117, p. 394–406, 2012.

MOBLEY, C. D. *Light and water: radiative transfer in natural waters*. Academic Press, 1994.

MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, v. 22, p. 709-722, 1977.

MOSES, W.; GITELSON, A.; BERDNIKOV, S.; POVAZHNYI, V. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data—successes and challenges. *Environmental Research Letters*, v. 4, 2009, doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045005.

NASCIMENTO, R. F. F. *Utilização de dados MERIS e in situ para a caracterização bio-óptica do reservatório de Itumbiara, GO*. 2010. 113 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.15.18.39-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3769MUL>>. Acesso em: 16 jul. 2013.

NICODEMUS, F.; RICHMOND, J.; HSIA, J. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. [S.l.]: National Bureau of Standards, 1977.

NOVO, E. M. Comportamento espectral da água. In: MENESES, P. R.(ed.). *Sensoriamento remoto reflectância dos alvos naturais*. Brasília, DF, Brasil: UnB, 2001.

NOVO, E.; STECH, J.; ALCÂNTARA, E. H.; LONDE, L.; ASSIREU, A.; BARBOSA, C. Integração de Dados do Sistema de Monitoramento Automático de Variáveis Ambientais (SIMA) e de Imagens Orbitais na Avaliação do Estado Trófico do Reservatório da UHE Funil. *Geografia*, v. 35, p. 641-660, 2010.

ODERMATT, D.; GITELSON, A.; BRANDO, V.; SCHAEPMAN, M. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 118, p. 116–126, 2012.

ORIGIN LAB CORPORATION. *Origin Pro8*. Northampton (USA): Origin Lab Corporation, 2007.



PALMER, J. M.; GRANT, B. G. *The art of radiometry*. Bellingham: Spie, 2009.

POPE, R.; FRY, E. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. *Applied Optics*, v. 36, n. 33, p. 8710-8723, 1997.

RICHARDSON, L. Remote Sensing of algal bloom dynamics: New research fuses remote sensing of aquatic ecosystems with algal accessory pigment analysis. *BioScience*, v. 46, p. 492-501, 1996.

ROCHA, M. B.; SAMPAIO, G.; GÔMARA, G.; DE FILIPPO, R. Spatial and temporal variation of limnological features, *Mycrocystis aeruginosa* and zooplankton in a eutrophic reservoir (Funil Reservoir, Rio de Janeiro). *Acta Limnológica Brasiliensis*, v. 14, n. 3, p. 73-86, 2002.

RUDORFF, C. M. *Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos*. 2006. 140 p. (INPE-14166-TDI/1083). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/Lrfdb>>. Acesso em: 16 jul. 2013.

SATHYENDRANATH, S.; BUKATA, R. P.; DOWELL, M.; DAVIS, C.; BABIN, M.; BERTHON, J. Colour of case 2 Waters. In: SATHYENDRANATH, S. (ed.) IOCCG, *remote sensing of ocean colour in coastal and other optically-complex waters*. Dartmouth: Canada, 2000.

SATHYENDRANATH, S.; PRIEUR, L.; MORELI, A. A 3-Component model of ocean color and its application to remote-sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, v. 10, n. 8, p. 1373-1394, 1989.

STECH, J.; LIMA, I.; NOVO, E.; SILVA, C.; ASSIREU, A.; LORENZZETTI, J. Telemetric Monitoring system for meteorological and limnological data acquisition. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, v. 29, p. 1747-1750, 2006.

SUBRAMANIAM, A.; CARPENTER, E. J.; FALKOWSKI, P. G. Bio-optical properties of the marine diazotrophic cyanobacteria *Trichodesmium* spp. II. A reflectance model for remote sensing. *Limnology and Oceanography*, v. 44, n. 3, p. 618–627, 1999.

TriOS. *MSDA\_XE Quick start manual*. Rastede (Germany): TriOS Optical Sensors, 2010.

TriOS. *RAMSES Hyperspectral Radiometer Manual*. Rastede (Germany): TriOS Optical Sensor, 2010.

TWARDOWSKI, M.; BOSS, E.; MACDONALD, J.; PEGAU, W.; BARNARD, A.; ZANEVELD, J. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, v. 106, n. C7, p. 14129-14142, 2001.

WET LABS. *ac Meter Protocol Document*. WET Labs, 2011.

WET LABS. *Spectral absorption and attenuation meter. AC-S. User's guide. (Revision J)*, 2009.

YSI. *6-Series: Multiparameter water quality sondes*. Ohio (USA): YSI Incorporated, 2011.

ZANEVELD, R.; BARNARD, A.; LEE, Z. Why are inherent optical properties needed in ocean colour remote sensing? In: LEE, Z.P. (ed.). *IOCCG, remote sensing of inherent optical properties: fundamentals, tests of algorithms and applications*. Dartmouth, Canada, 2006.

ZIBORDI, G. *Marine optics: field radiometry*. Southampton, United Kingdom: University of Southampton, 2007.

## APÊNDICE A

### GRÁFICOS DO PONTO AMOSTRAL 05

Tabela A-1: Características gerais do ponto amostral 05.

Onde: Chl-a é a clorofila-a; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 05			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
Chl-a	µg.L <sup>-1</sup>	10,2	39,7
Feo		0,4	2,7
MSI		0,8	3,6
MSO		2,8	9,2
MST	mg.L <sup>-1</sup>	3,6	12,8
CID		3,6	4,6
COD		2,4	3,3
CTD		6,0	7,9
Profundidade	m	11,3	10
Secchi		2,4	1,2
O <sub>2</sub>	%	95,5	114,3
pH		6,95	8,18
Turbidez	ntu	3,7	20,8
Horário de aquisição	Horário de Brasília	12:02	11:45

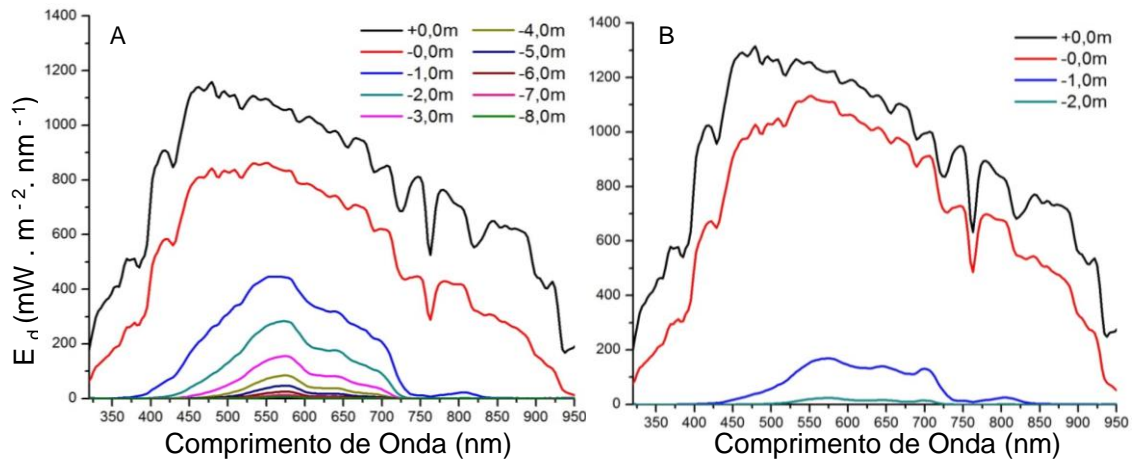


Figura A.1: Irradiância Descendente para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

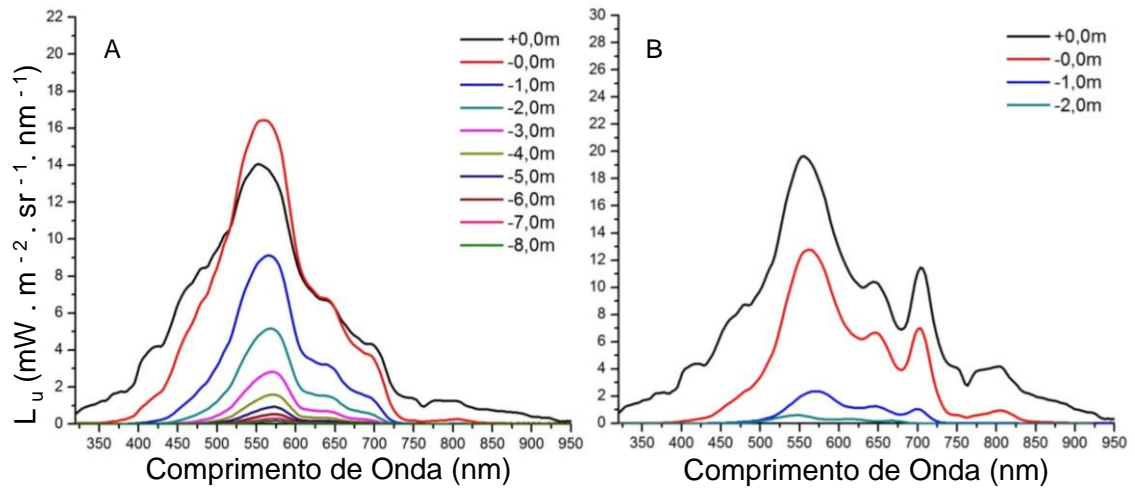


Figura A. 2: Radiância ascendente para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

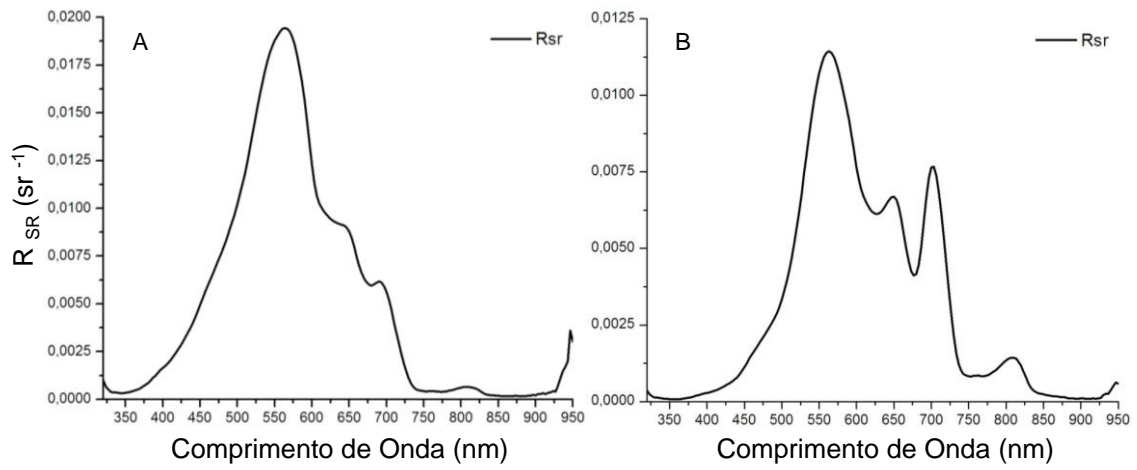


Figura A. 3: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

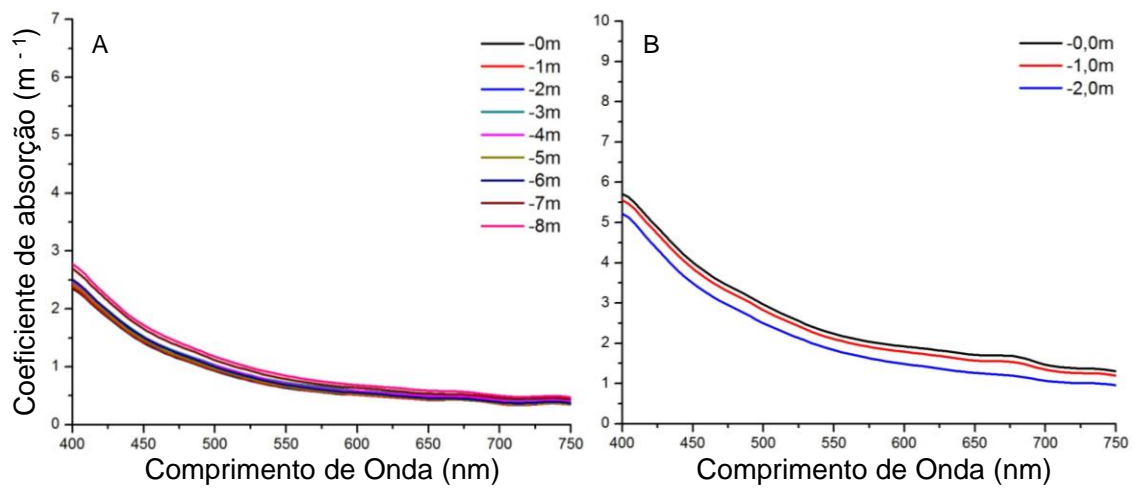


Figura A. 4: Coeficiente de absorção para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

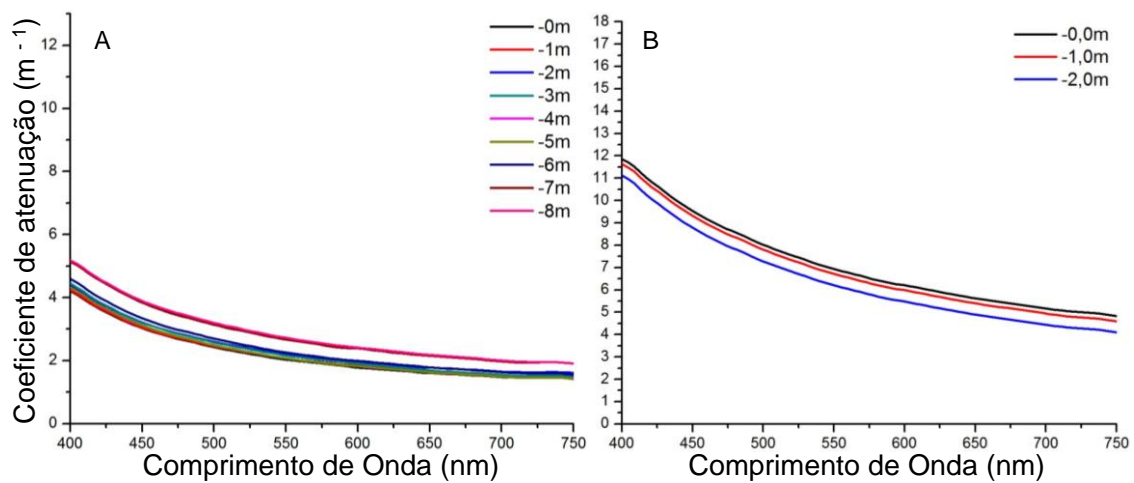


Figura A. 5: Coeficiente de atenuação para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

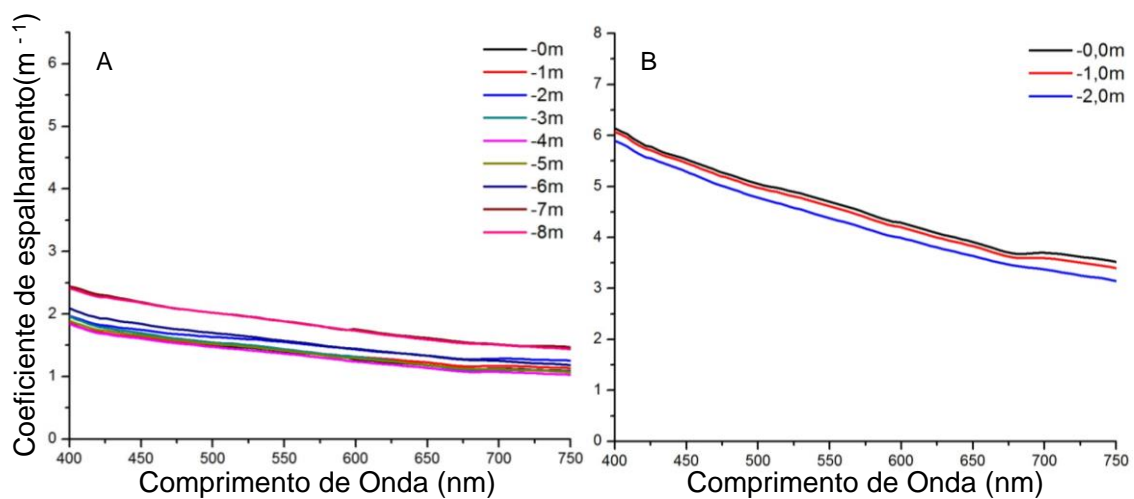


Figura A. 6: Coeficiente de espalhamento para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

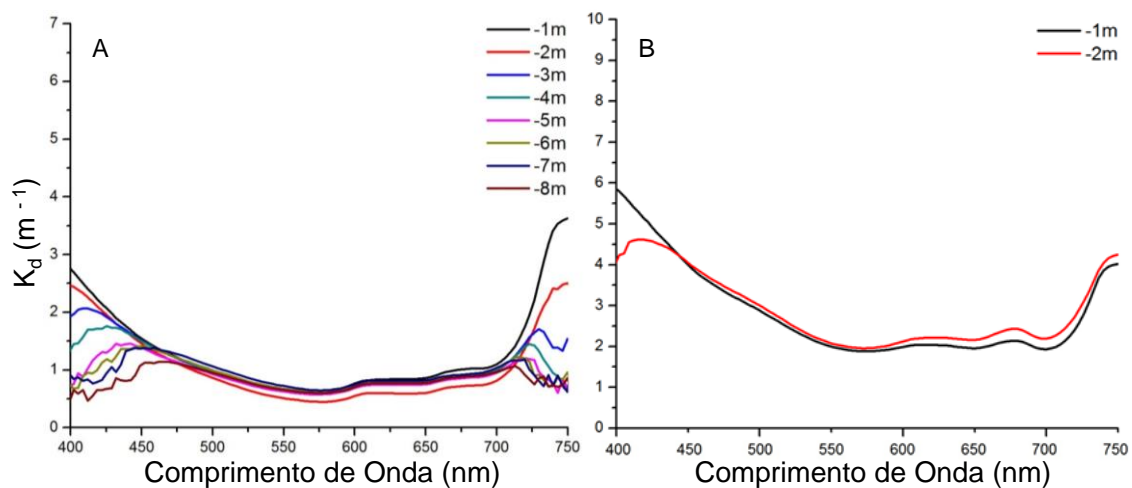


Figura A. 7: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

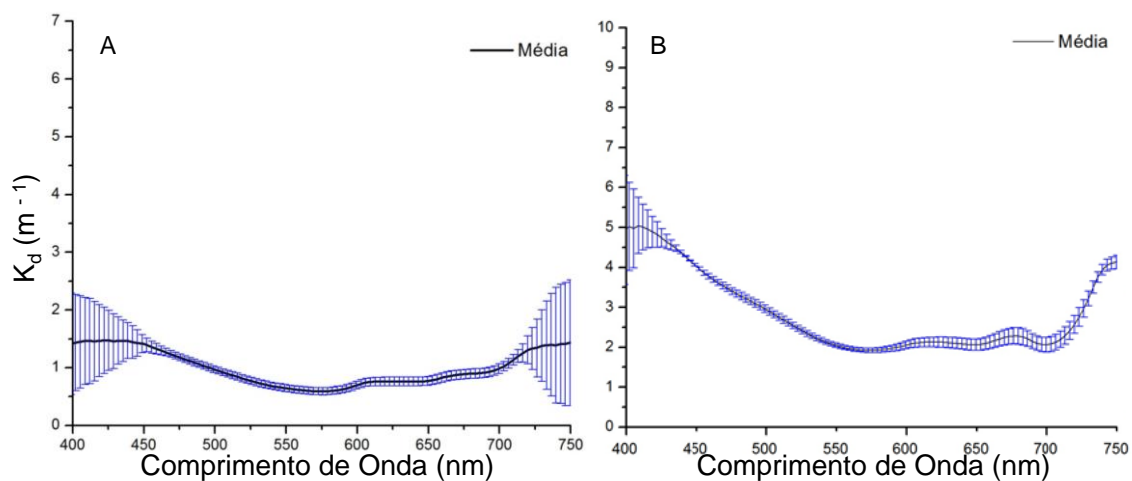


Figura A. 8: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

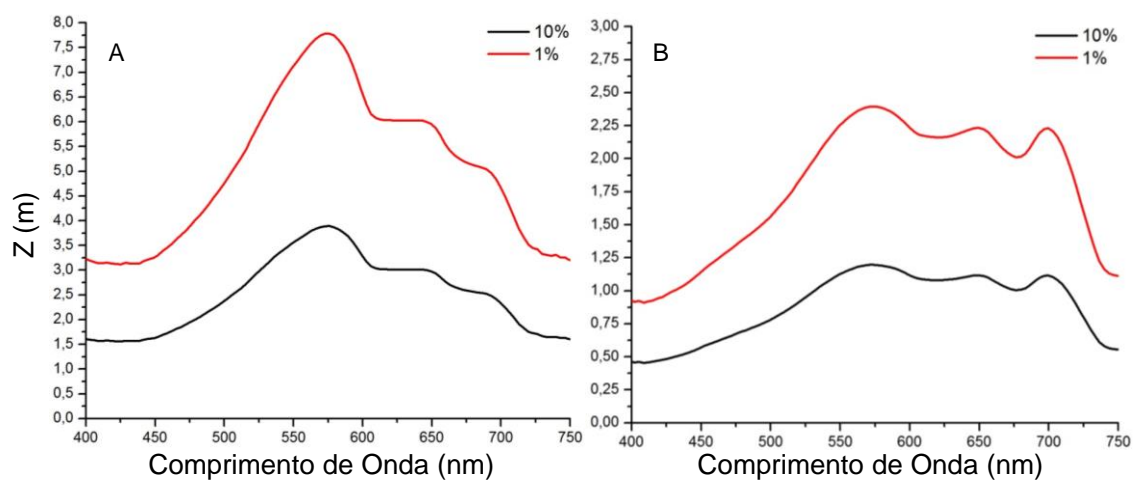


Figura A. 9: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.



## GRÁFICOS DO PONTO AMOSTRAL 07

Tabela A-2: Características gerais do ponto amostral 07.

Onde: Chl-a é a clorofila-a; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 07			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
[Chl-a]	µg.L-1	6,6	144,2
[Feo]		1,2	0
[MSI]		8,1	3
[MSO]		2	30
[MST]	mg.L-1	10,1	33
[CID]		4	5,1
[COD]		1,9	2,9
[CDT]		5,9	8
Profundidade	m	37	29
Secchi		2,8	0,6
O <sub>2</sub>	%	92,6	131,2
pH		6,89	9,05
Turbidez	ntu	2,7	50,7
Horário de aquisição	Horário de Brasília	12:47	12:50

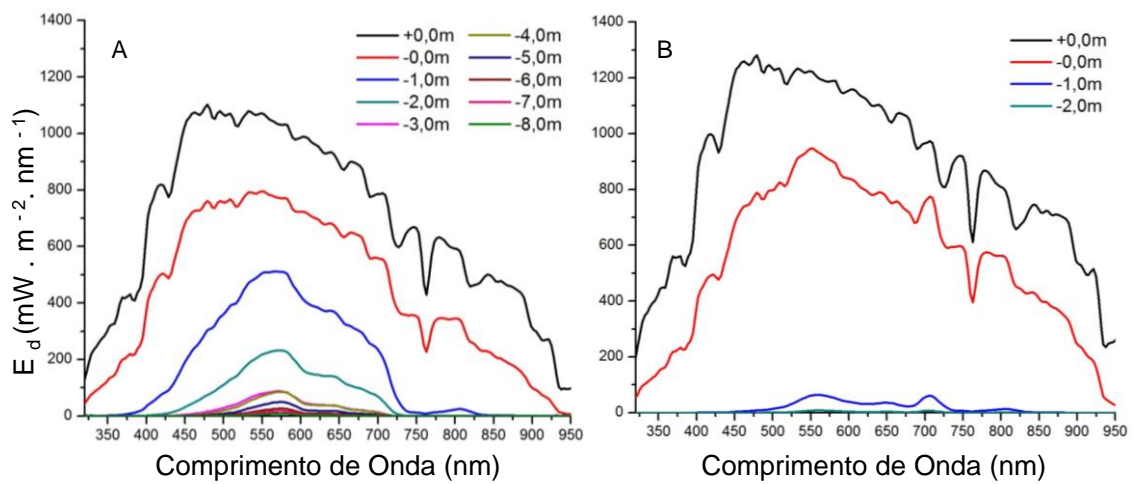


Figura A. 10: Irradiância descendente para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

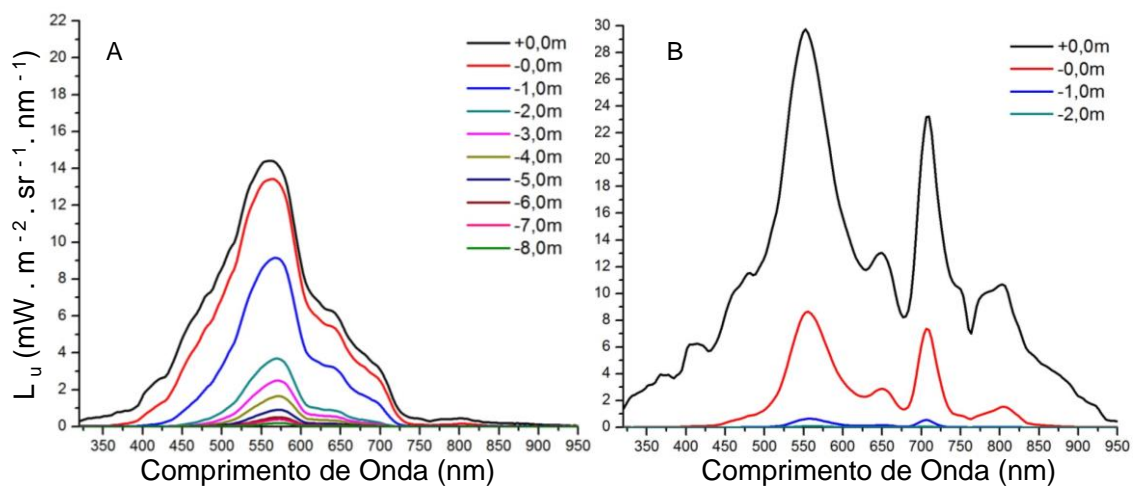


Figura A. 11: Radiância ascendente para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

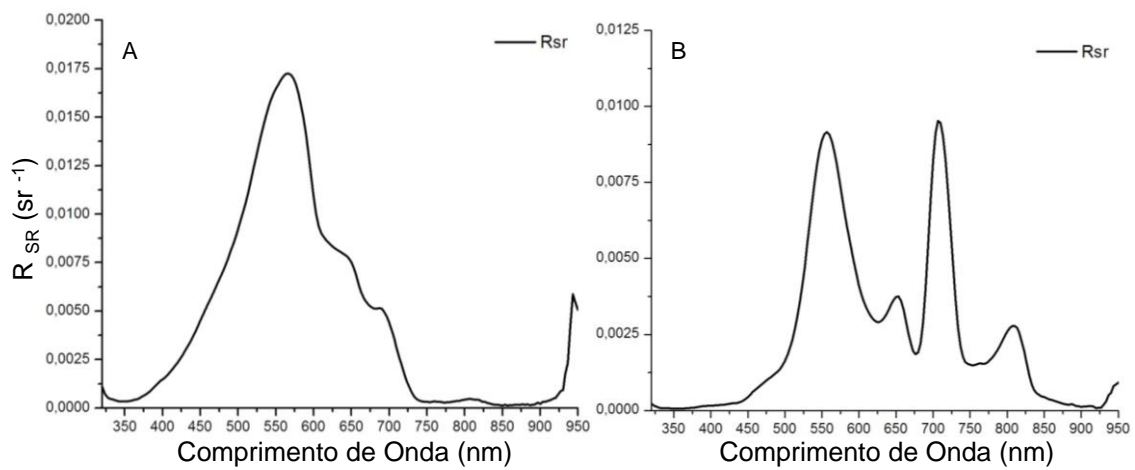


Figura A. 12: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

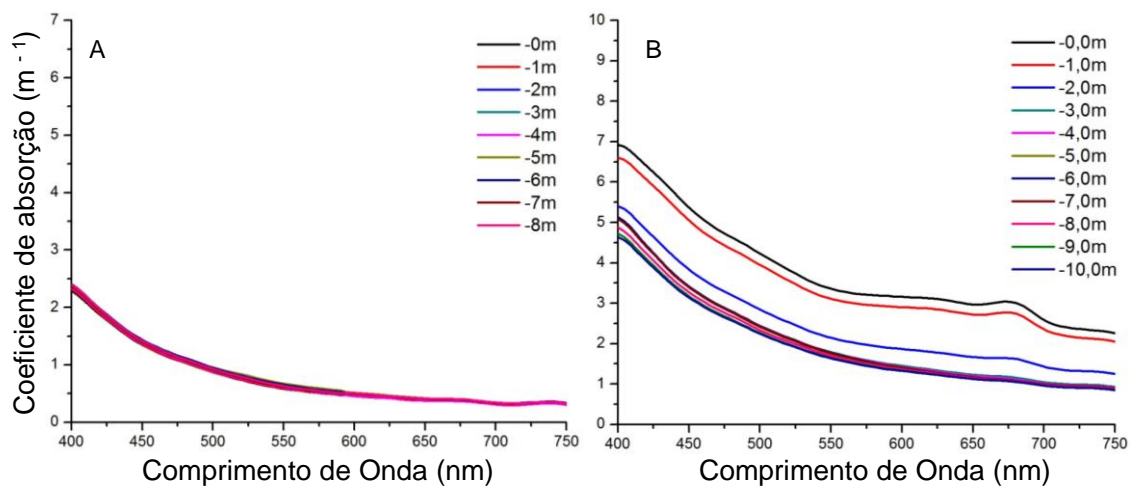


Figura A. 13: Coeficiente de absorção para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

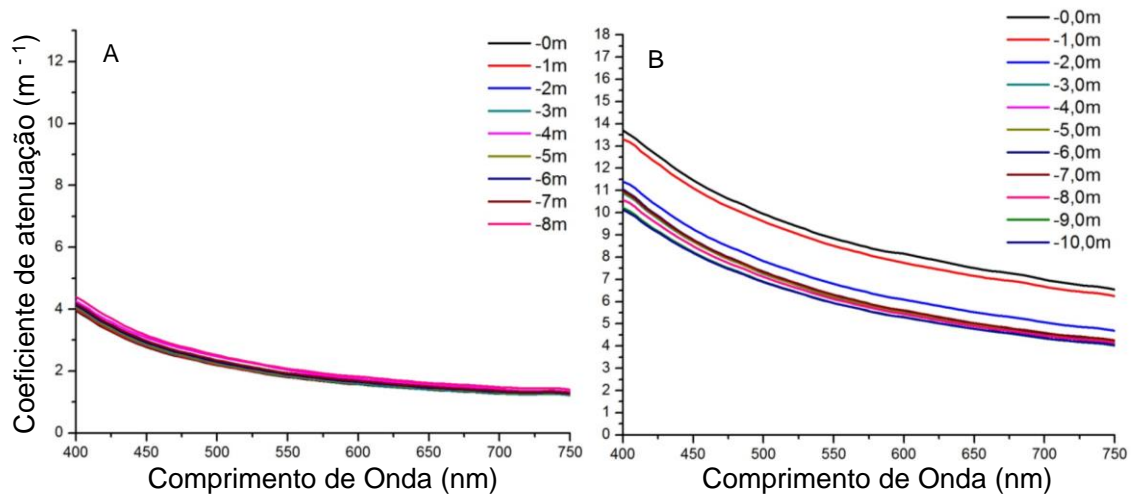


Figura A. 14: Coeficiente de atenuação para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

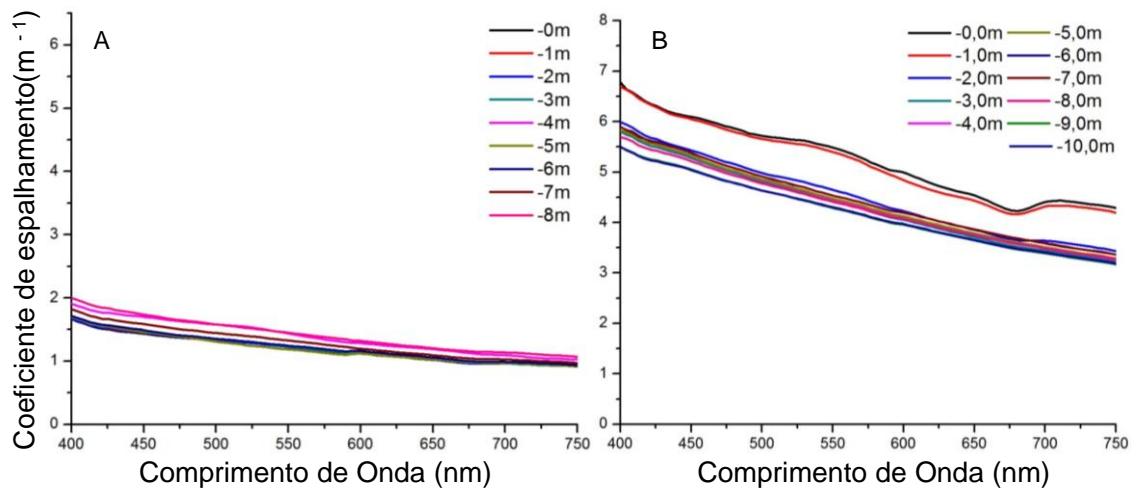


Figura A. 15: Coeficiente de espalhamento para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

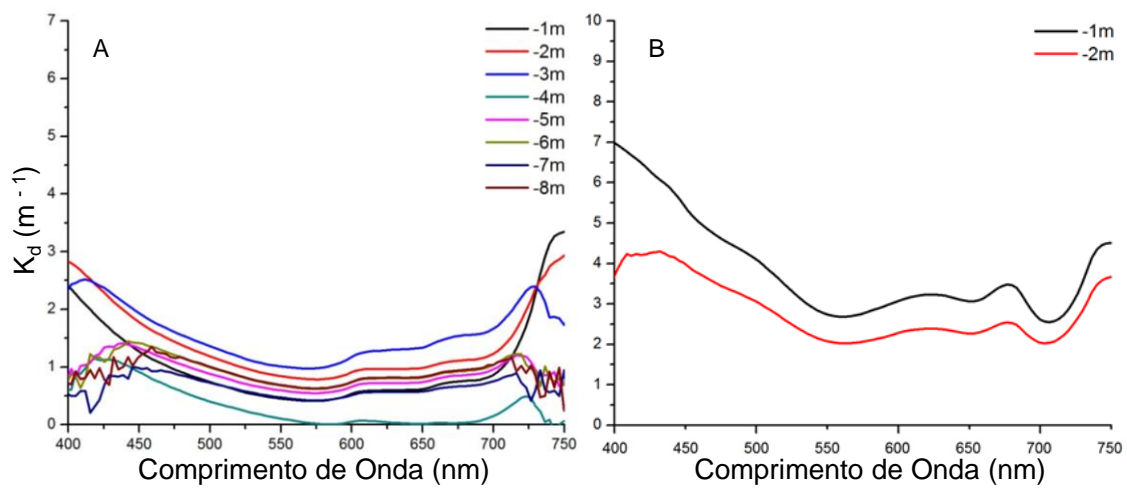


Figura A. 16: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

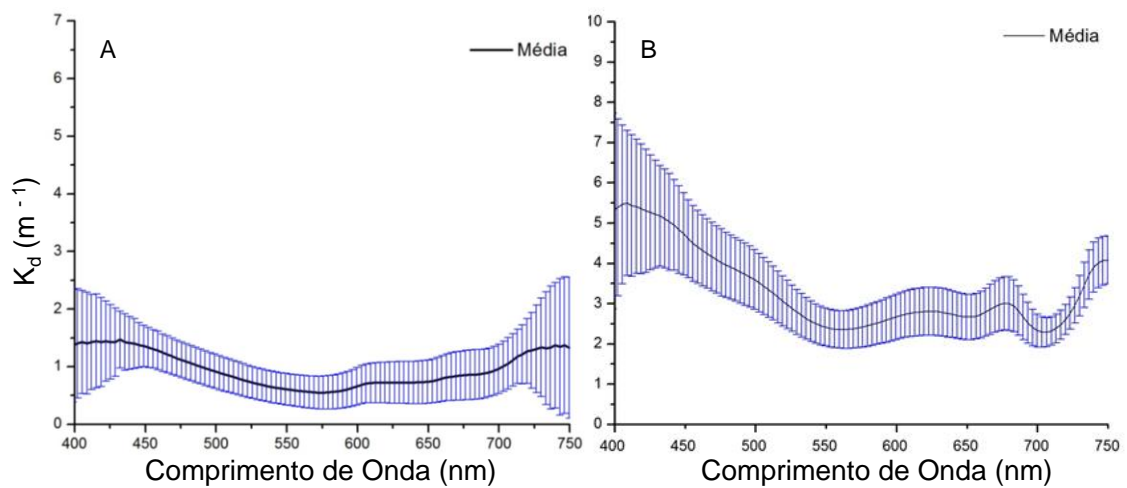


Figura A. 17: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

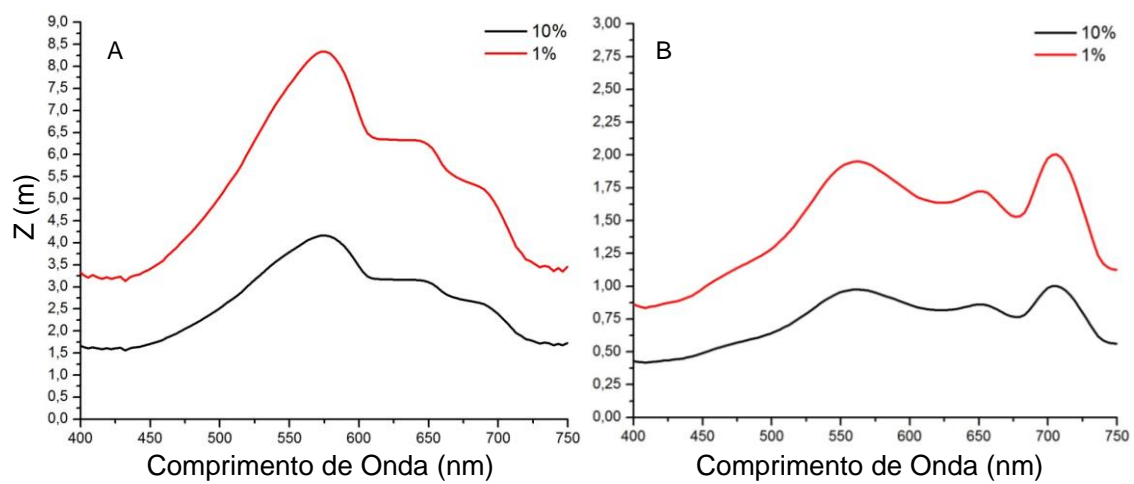


Figura A. 18: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

## GRÁFICOS DO PONTO AMOSTRAL 09

Tabela A-3: Características gerais do ponto amostral 09.

Onde: Chl-a é a clorofila-a; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 09			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
[Chl-a]	µg.L <sup>-1</sup>	4,8	205,8
[Feo]		1,2	5,9
[MSI]		0,5	0
[MSO]		2,1	44
[MST]	mg.L <sup>-1</sup>	2,6	44
[CID]		4,3	3,5
[COD]		1,4	3,5
[CDT]		5,7	7
Profundidade	m	40,8	32
Secchi		2,8	0,5
O <sub>2</sub>	%	92,5	190,6
pH		6,87	9,99
Turbidez	ntu	2,1	67
Horário de aquisição	Horário de Brasília	13:45	13:37

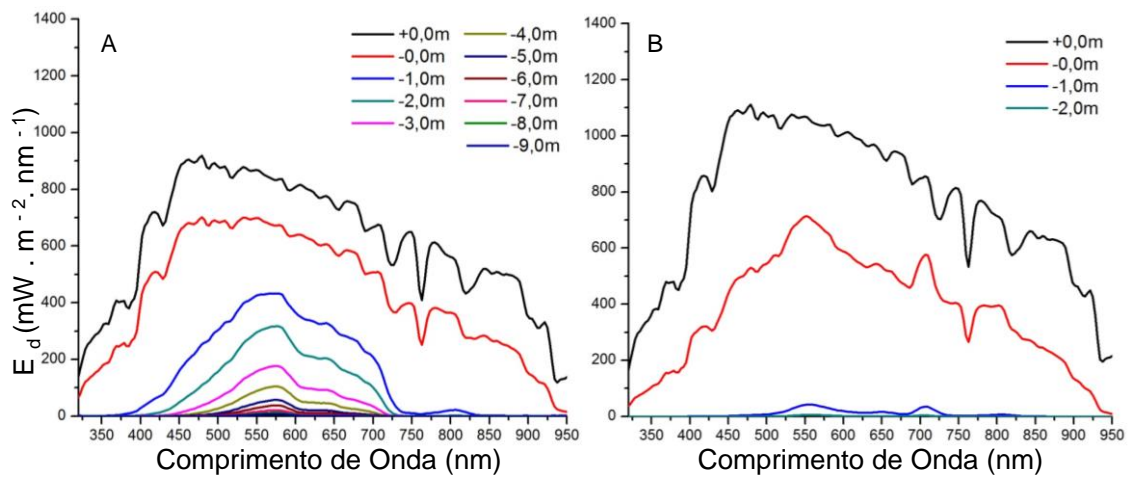


Figura A. 19: Irradiância Descendente para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.

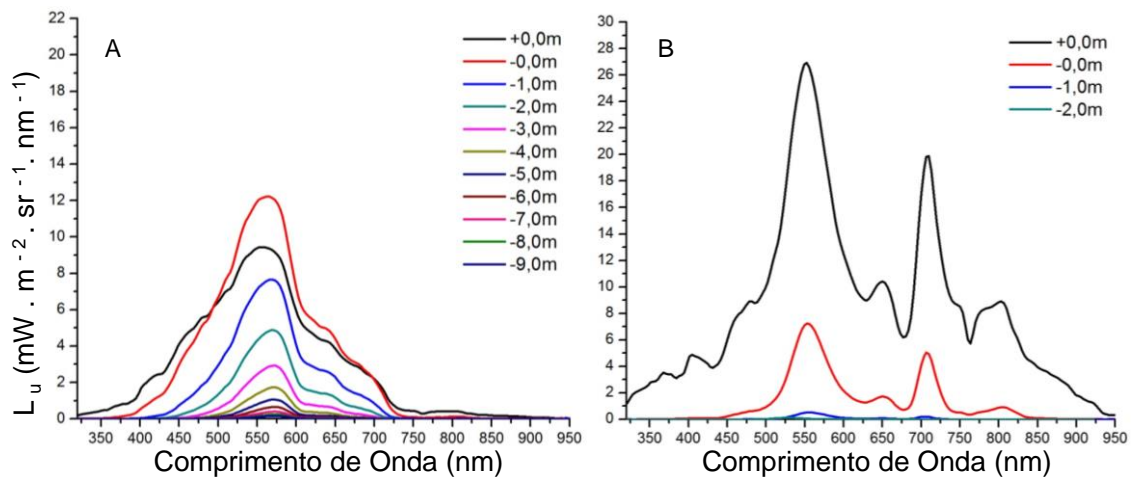


Figura A. 20: Radiância ascendente para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.



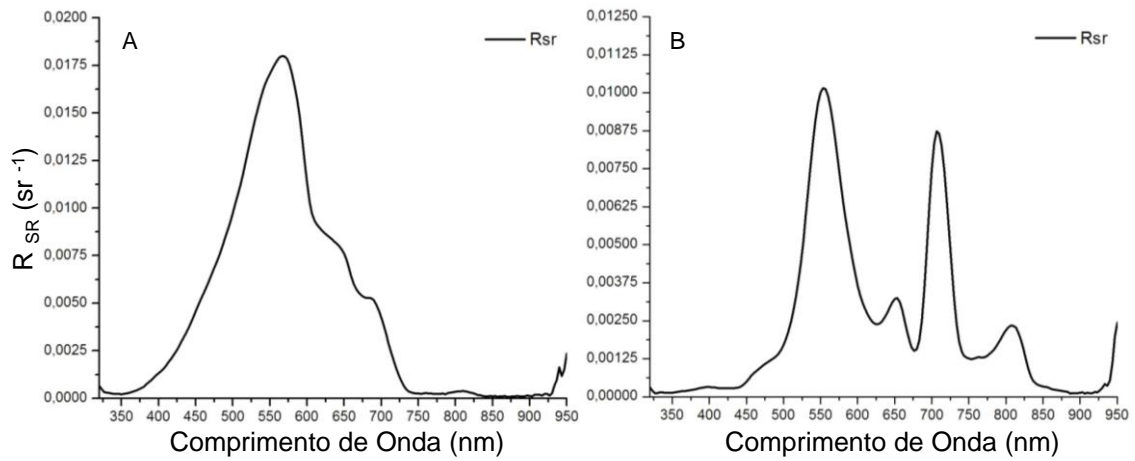


Figura A. 21: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.

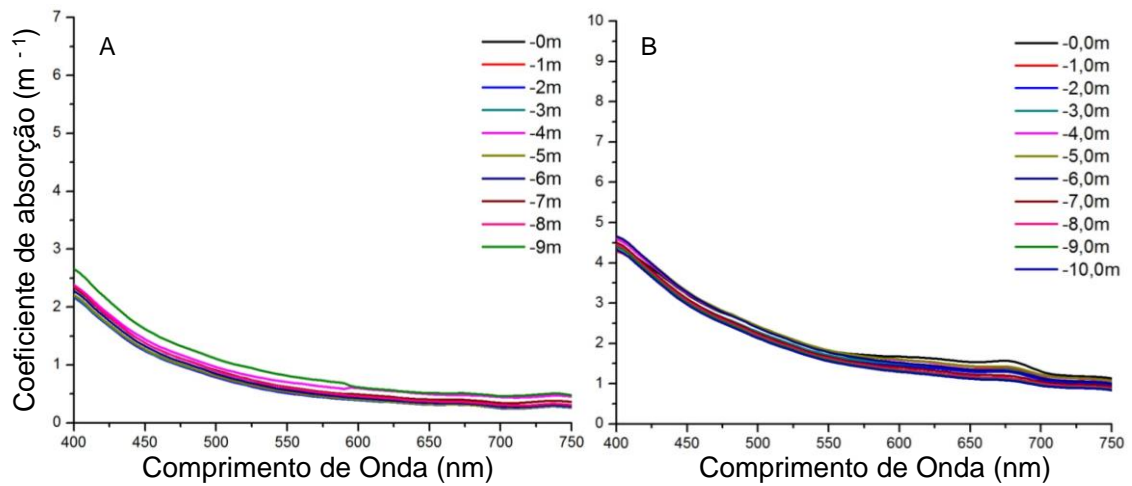


Figura A. 22: Coeficiente de absorção para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.

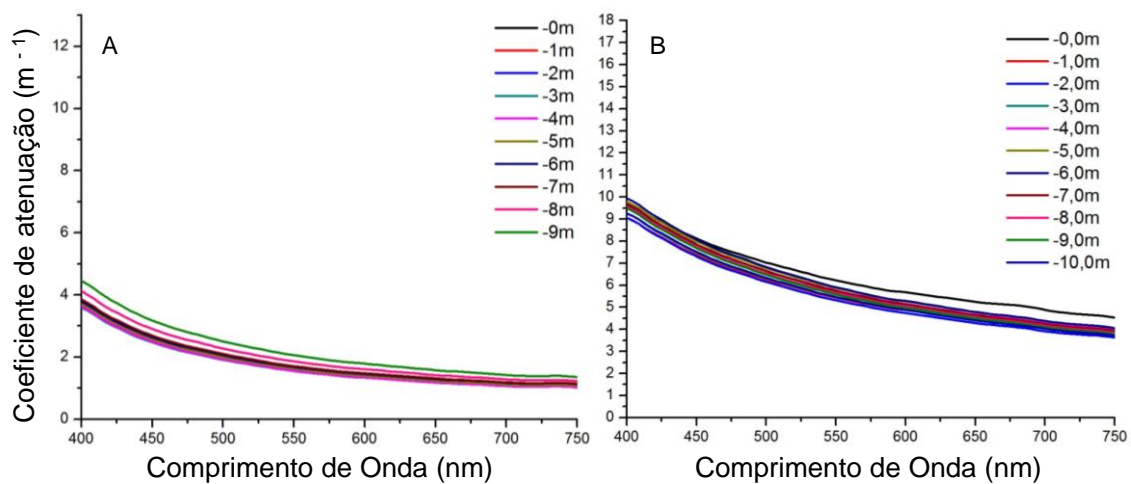


Figura A. 23: Coeficiente de atenuação para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.

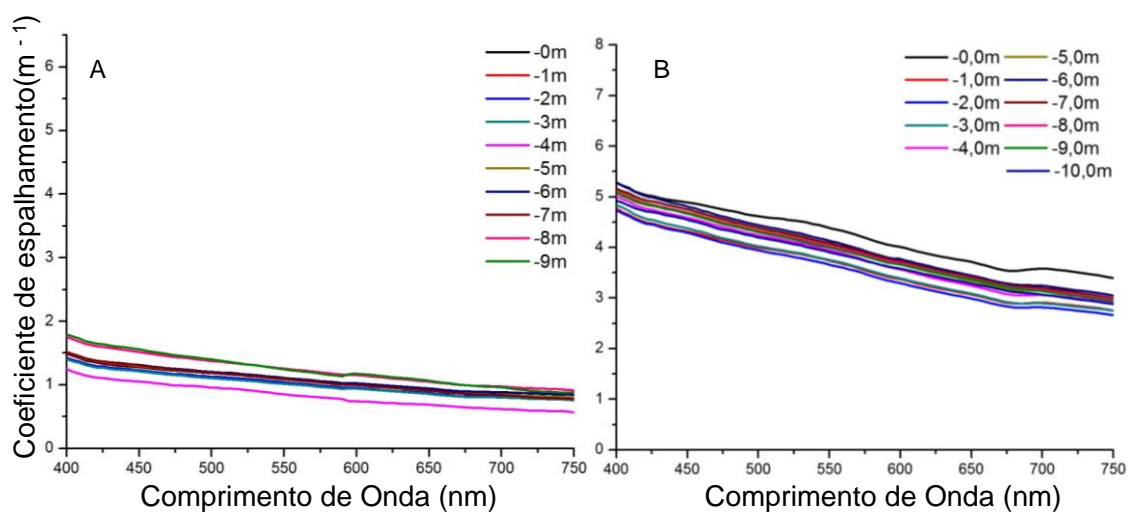


Figura A. 24: Coeficiente de espalhamento para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.

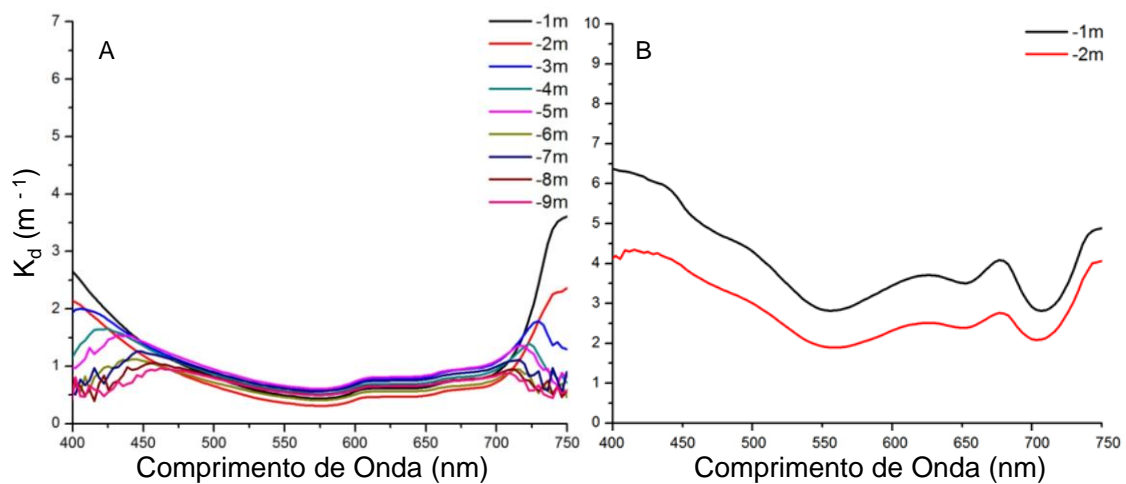


Figura A. 25: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.

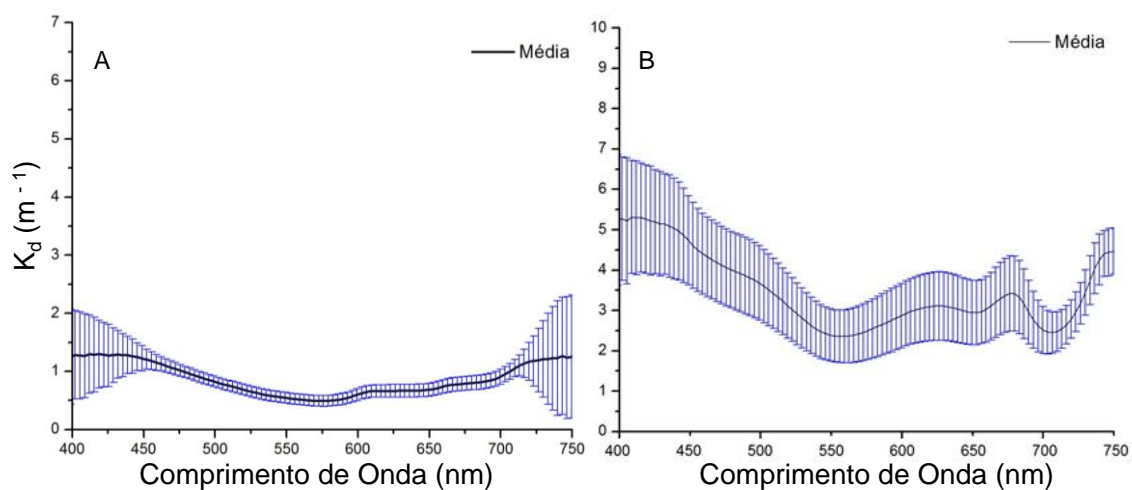


Figura A. 26: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.

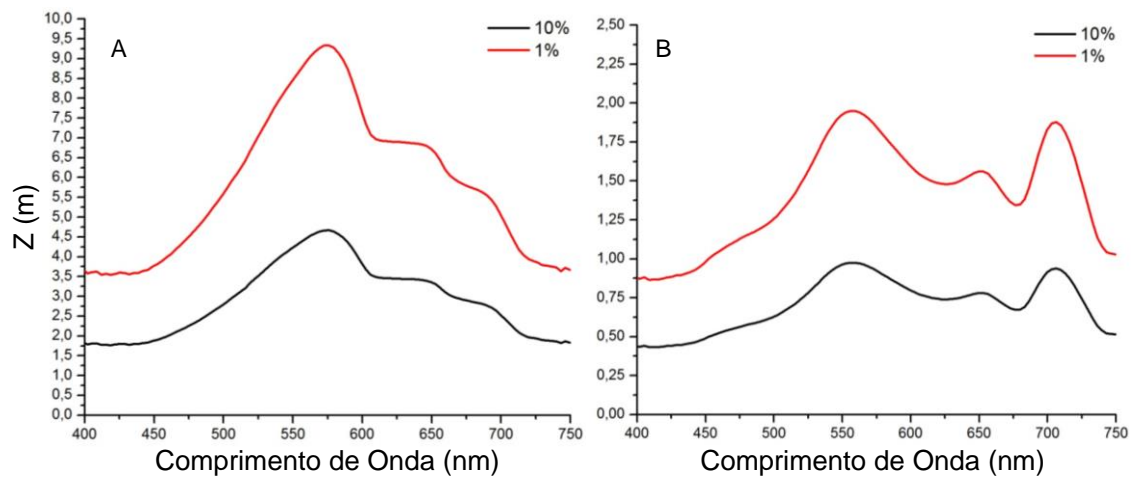


Figura A. 27: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.

## GRÁFICOS DO PONTO AMOSTRAL 10

Tabela A-4: Características gerais do ponto amostral 10.

Onde: Chl-a é a clorofila-a; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 10			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
[Chl-a]	µg.L <sup>-1</sup>	4,6	143,2
[Feo]		3	0
[MSI]		0,2	1
[MSO]		1,9	34
[MST]	mg.L <sup>-1</sup>	2,1	35
[CID]		4,3	3,4
[COD]		2	2,8
[CDT]		6,3	6,2
Profundidade	m	48,8	42,5
Secchi		2,9	0,6
O <sub>2</sub>	%	94,3	131,2
pH		6,95	10,14
Turbidez	ntu	2,3	41
Horário de aquisição	Horário de Brasília	14:22	14:02

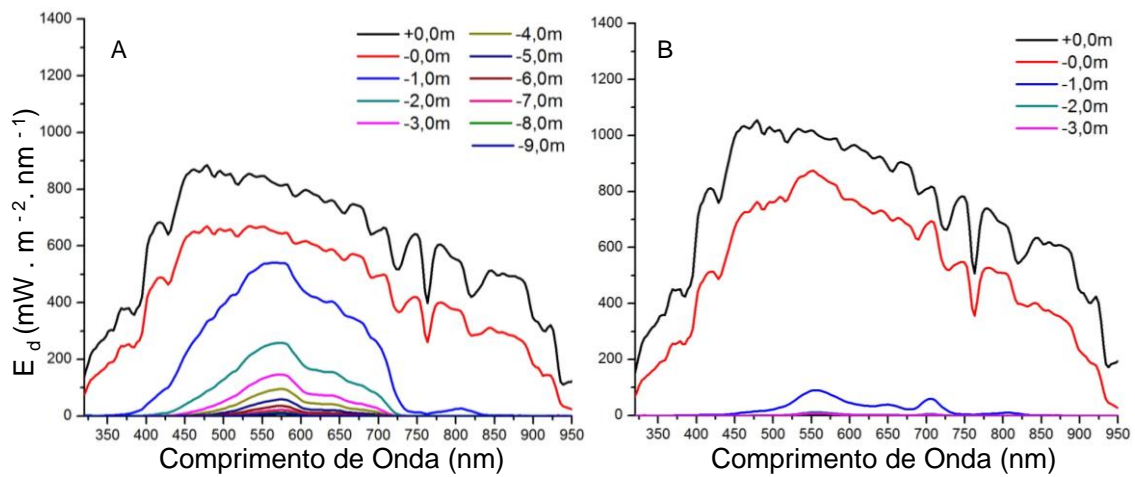


Figura A. 28: Irradiância Descendente para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.

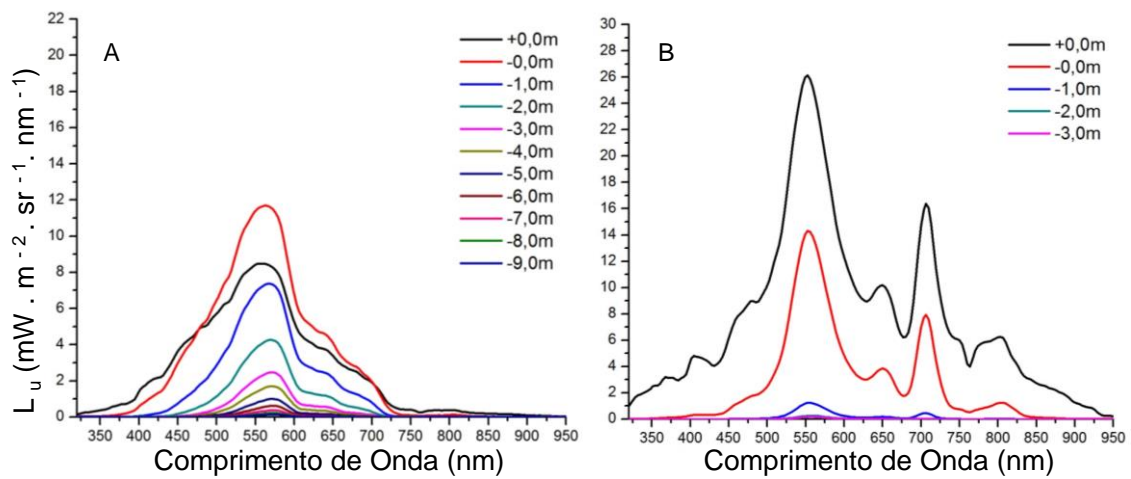


Figura A. 29: Radiância ascendente para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.

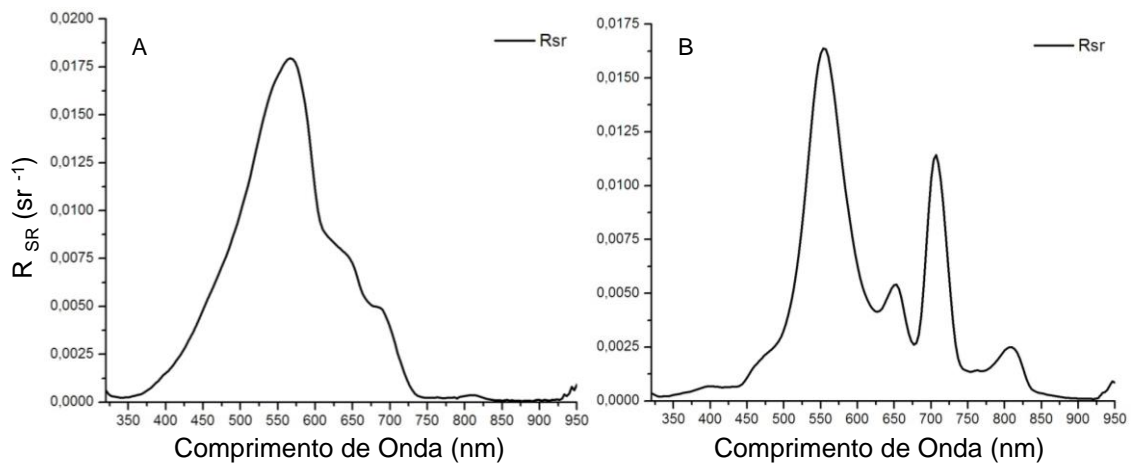


Figura A. 30: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.

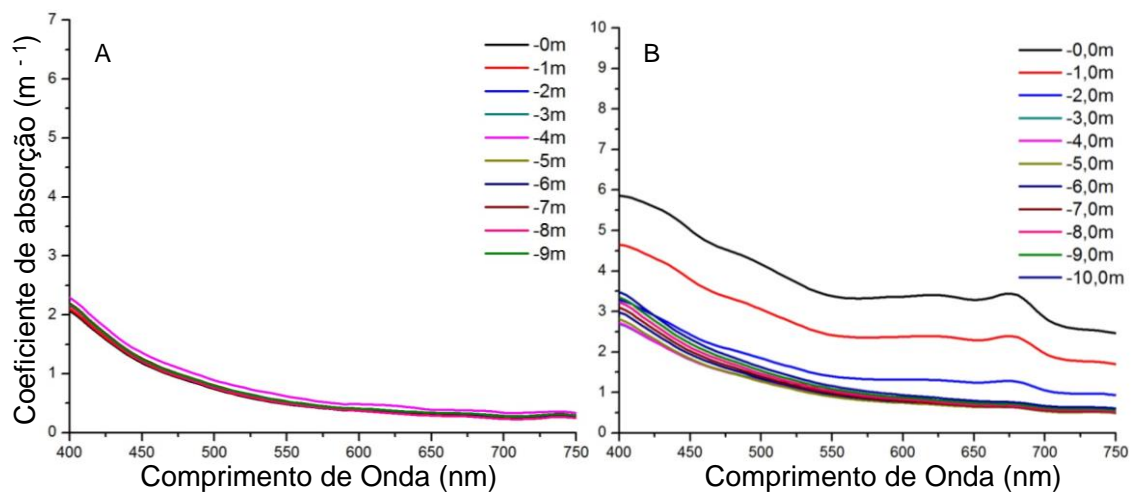


Figura A. 31: Coeficiente de absorção para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.

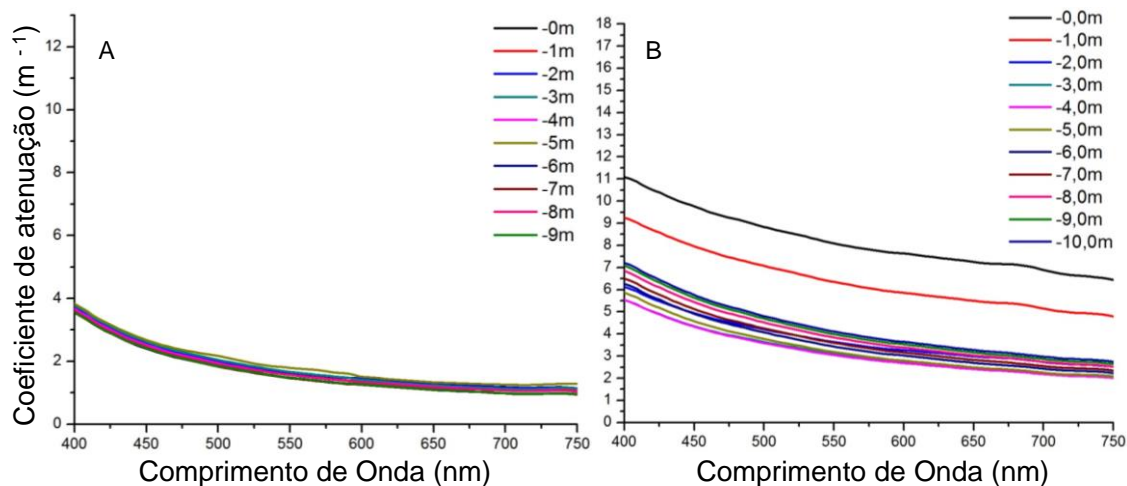


Figura A. 32: Coeficiente de atenuação para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.

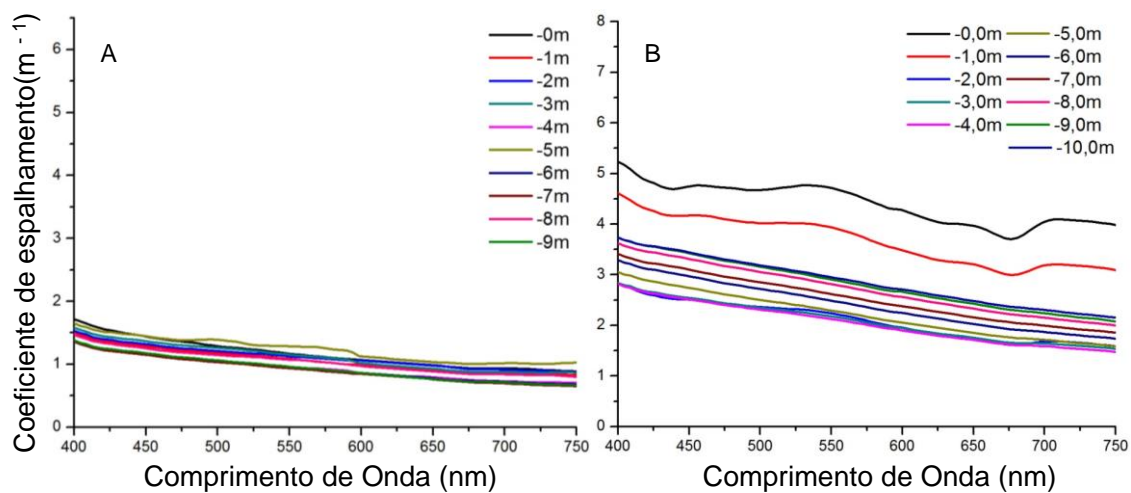


Figura A. 33: Coeficiente de espalhamento para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.



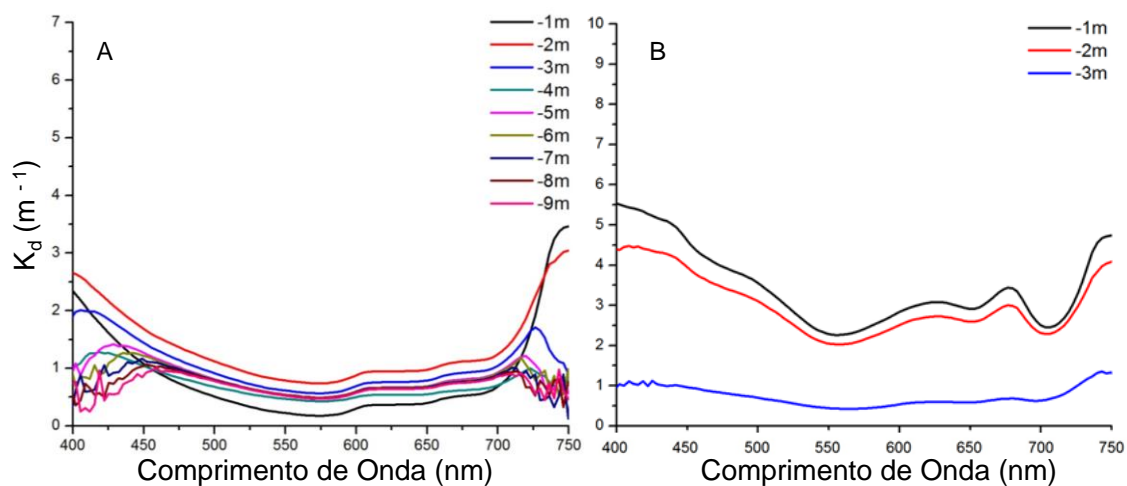


Figura A.34: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.

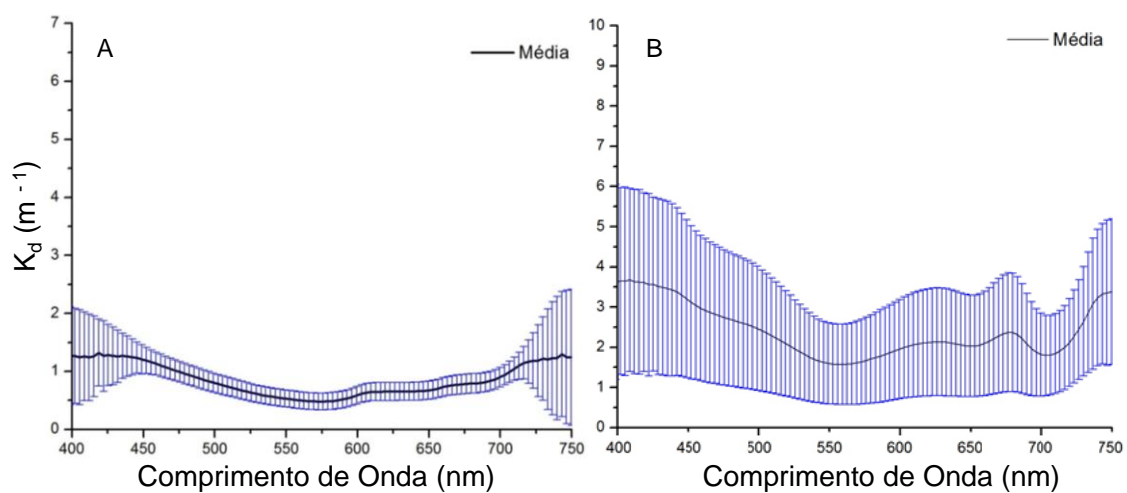


Figura A. 35: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.

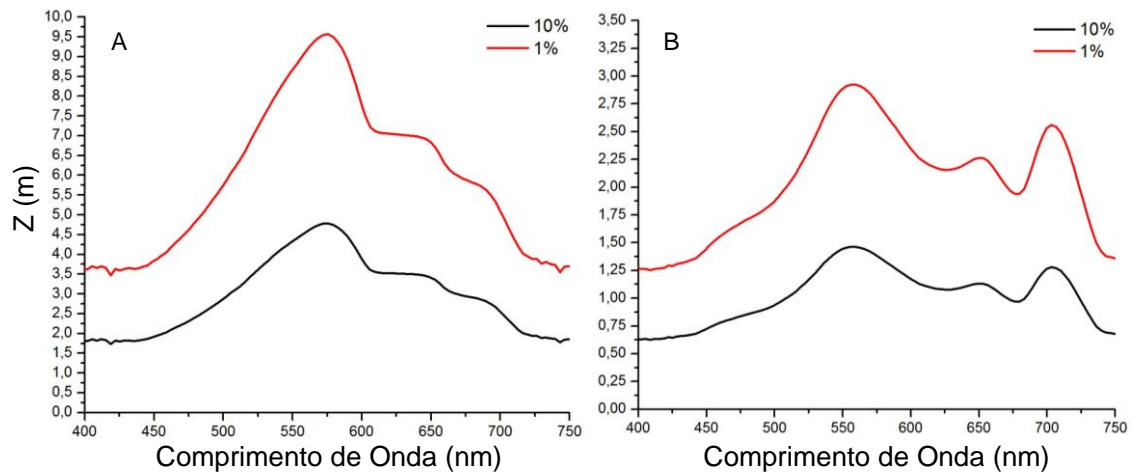


Figura A. 36: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.

## GRÁFICOS DO PONTO AMOSTRAL 11

Tabela A-5: Características gerais do ponto amostral 11.

Onde: Chl-a é a clorofila-a; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 11			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
[Chl-a]	µg.L <sup>-1</sup>	5,4	26,4
[Feo]		3,8	1,5
[MSI]		0,6	0
[MSO]		1,9	9,7
[MST]	mg.L <sup>-1</sup>	2,5	9,7
[CID]		4,5	3,5
[COD]		2,4	3,3
[CDT]		6,9	6,8
Profundidade	m	45,1	39
Secchi		2,6	1,1
O <sub>2</sub>	%	94,6	136,7
pH		6,95	9,6
Turbidez	ntu	1,8	12,6
Horário de aquisição	Horário de Brasília	14:43	14:30

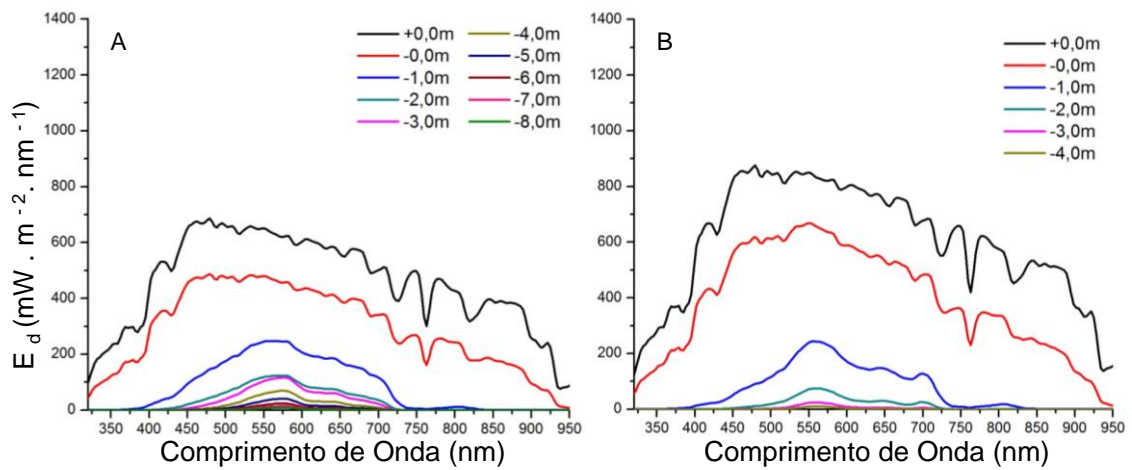


Figura A. 37: Irradiância descendente para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.

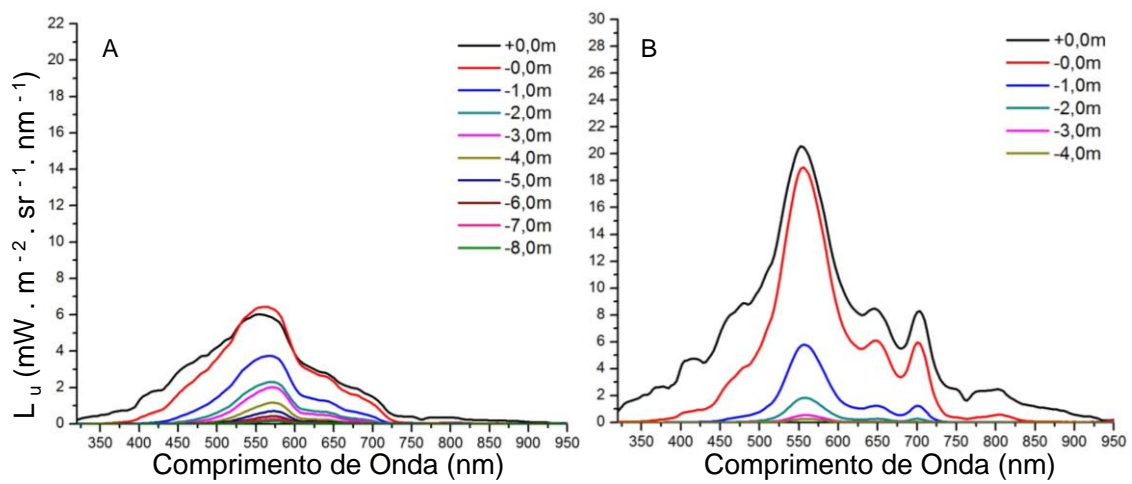


Figura A. 38: Radiância ascendente para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.

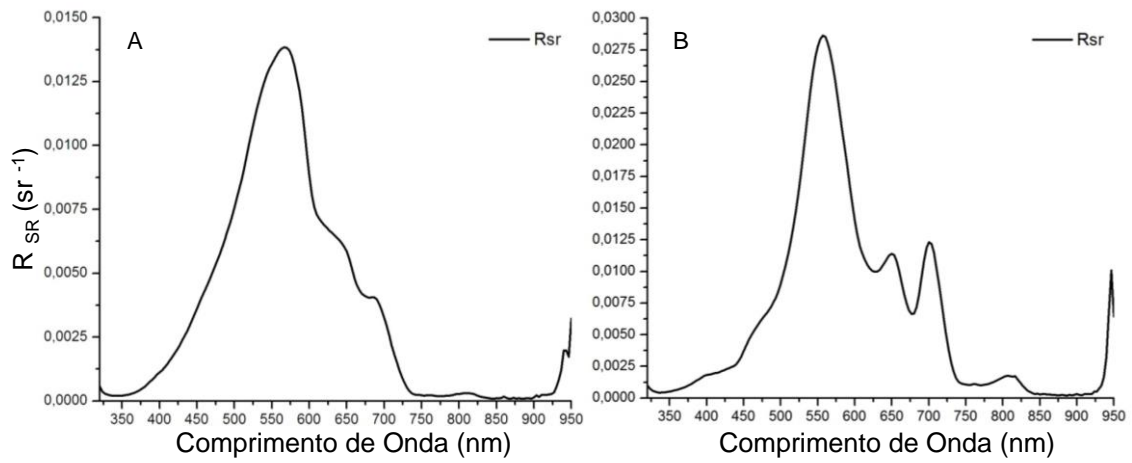


Figura A. 39: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.

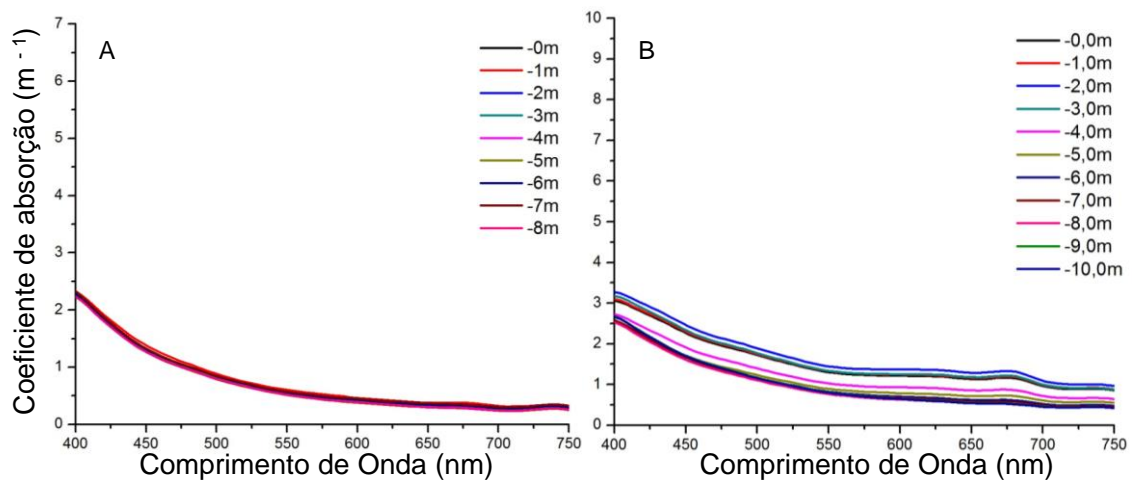


Figura A. 40: Coeficiente de absorção para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.

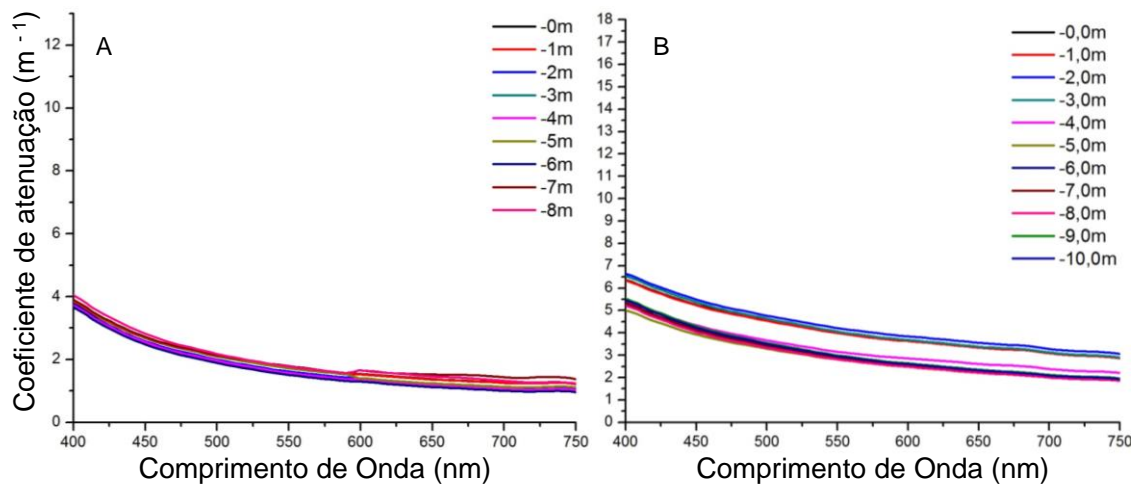


Figura A. 41: Coeficiente de atenuação para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.

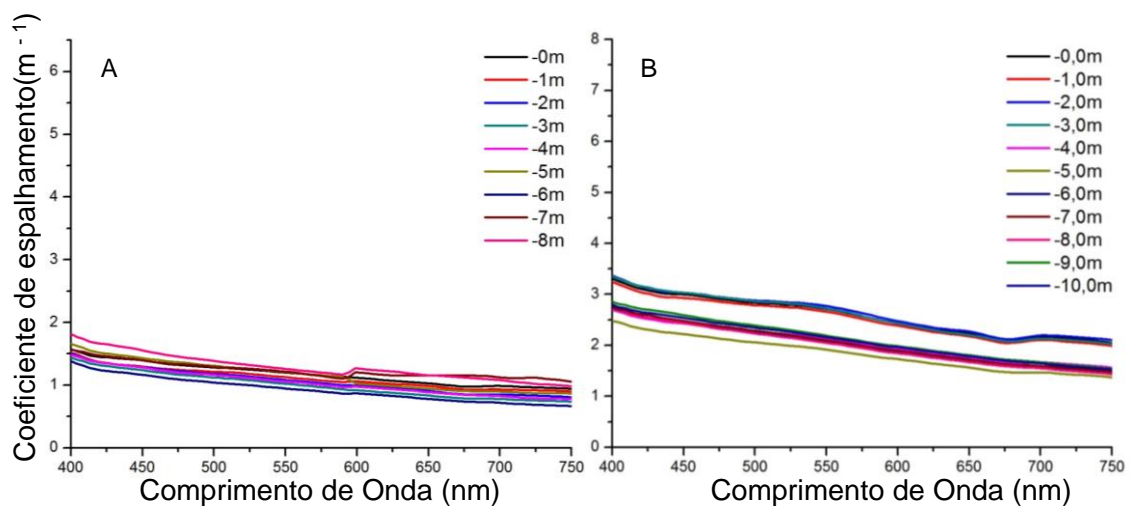


Figura A. 42: Coeficiente de espalhamento para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.

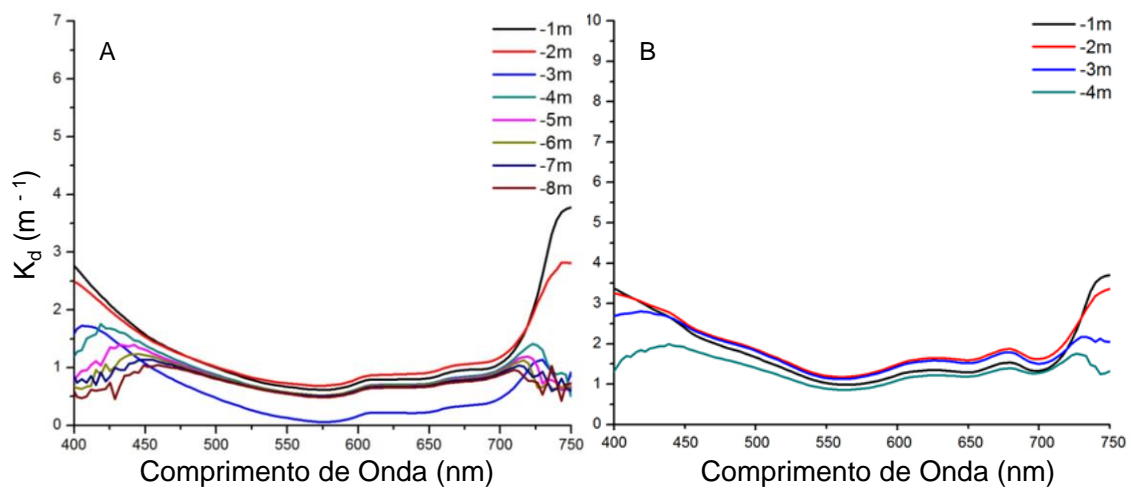


Figura A. 43: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.

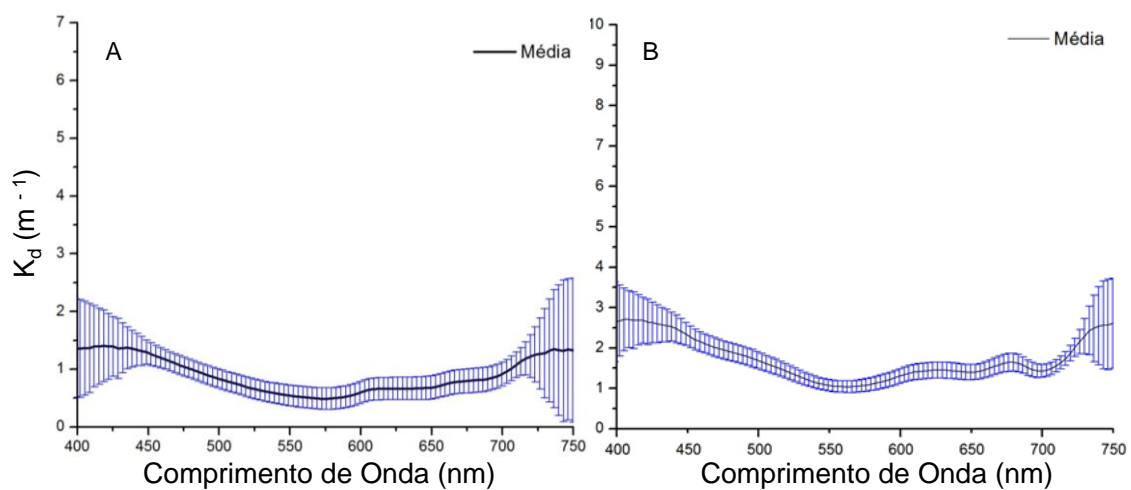


Figura A. 44: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.

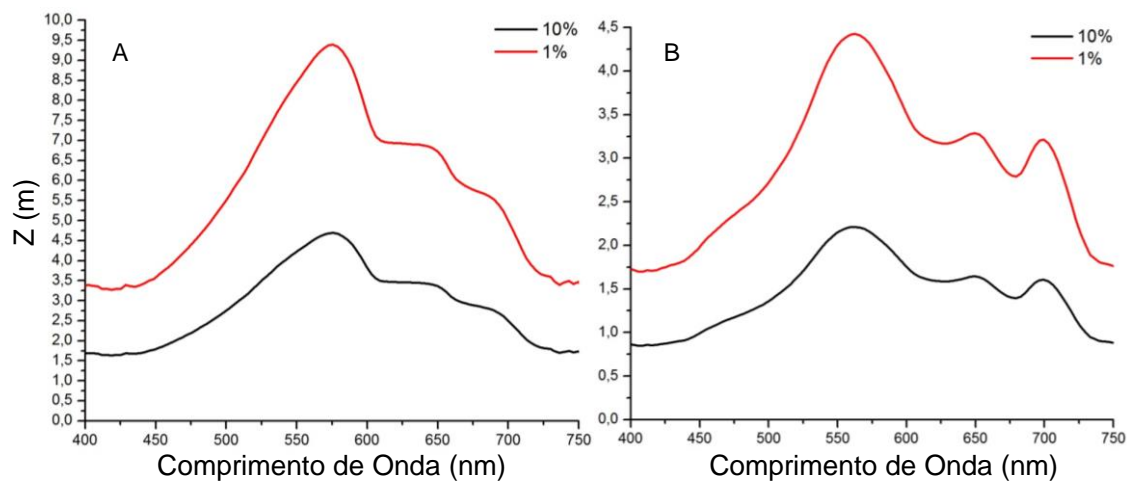


Figura A. 45: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.



## GRÁFICOS DO PONTO AMOSTRAL 22

Tabela A-6: Características gerais do ponto amostral 22.

Onde: Chl-a é a clorofila-a; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 22			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
[Chl-a]	µg.L <sup>-1</sup>	2,7	13,7
[Feo]		7,3	1,4
[MSI]		0,7	1,4
[MSO]		1,5	4
[MST]	mg.L <sup>-1</sup>	2,2	5,4
[CID]		4,3	4,2
[COD]		2,2	3,7
[CDT]		6,5	7,9
Profundidade	m	38,5	28
Secchi		2,2	1,6
O <sub>2</sub>	%	89,6	121,3
pH		6,63	8,83
Turbidez	ntu	2,2	7,2
Horário de aquisição	Horário de Brasília	12:00	13:00

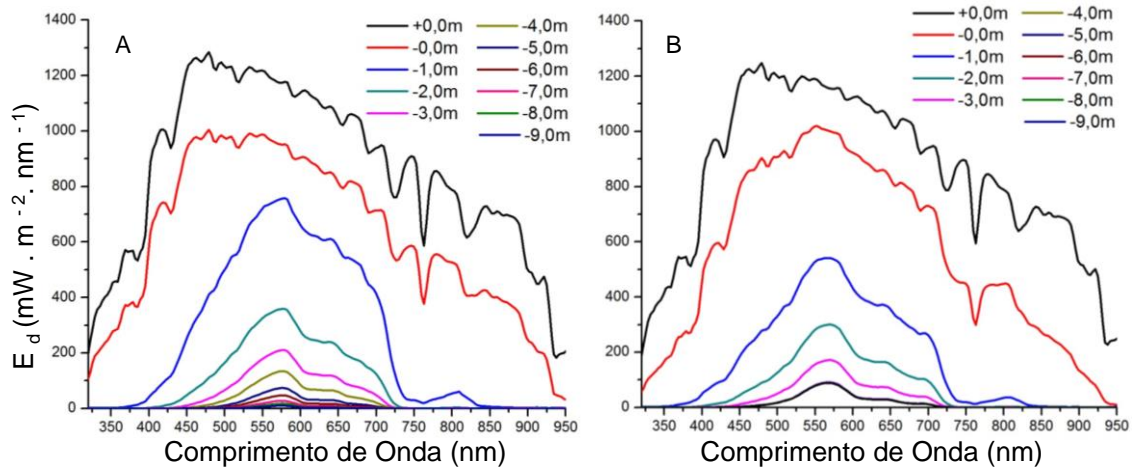


Figura A. 46: Irradiância Descendente para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.

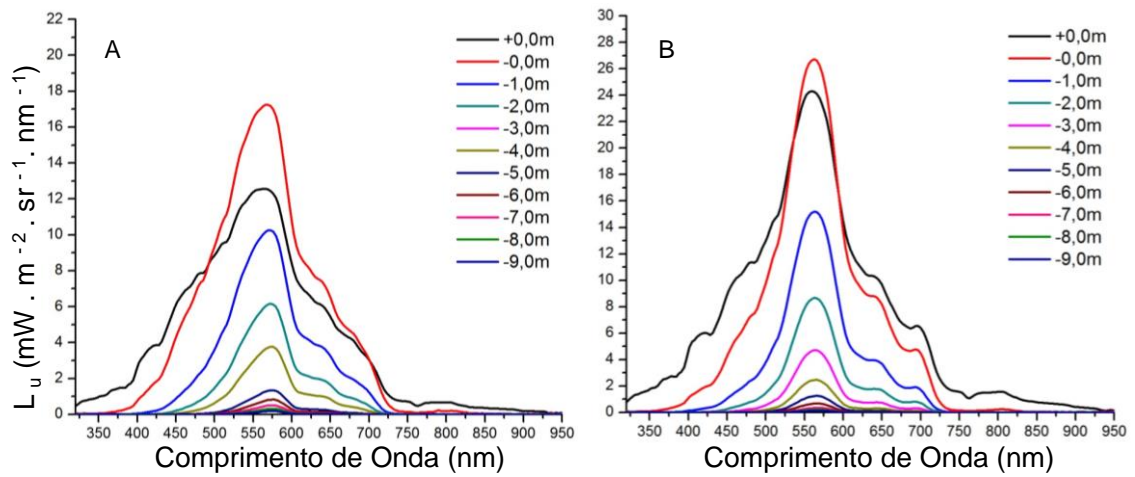


Figura A. 47: Radiância Emergente para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.

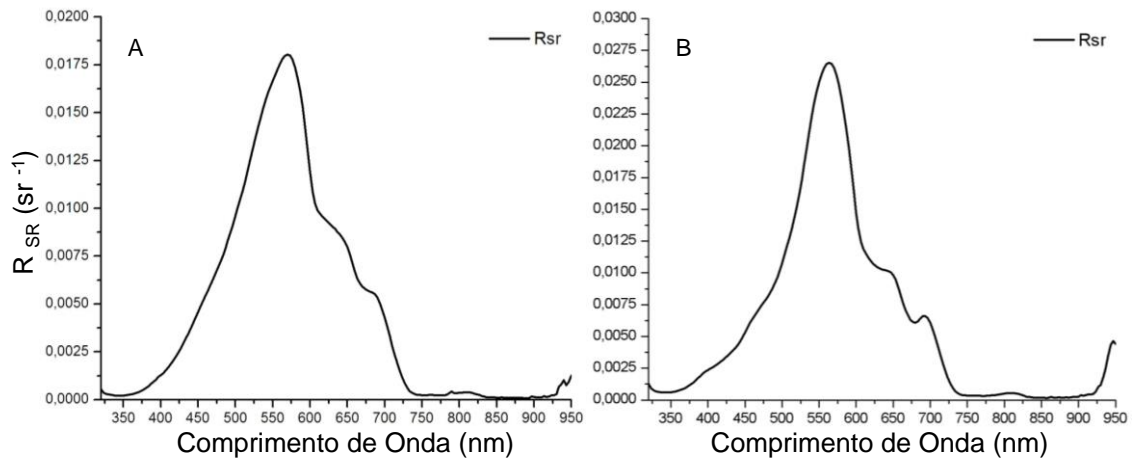


Figura A. 48: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

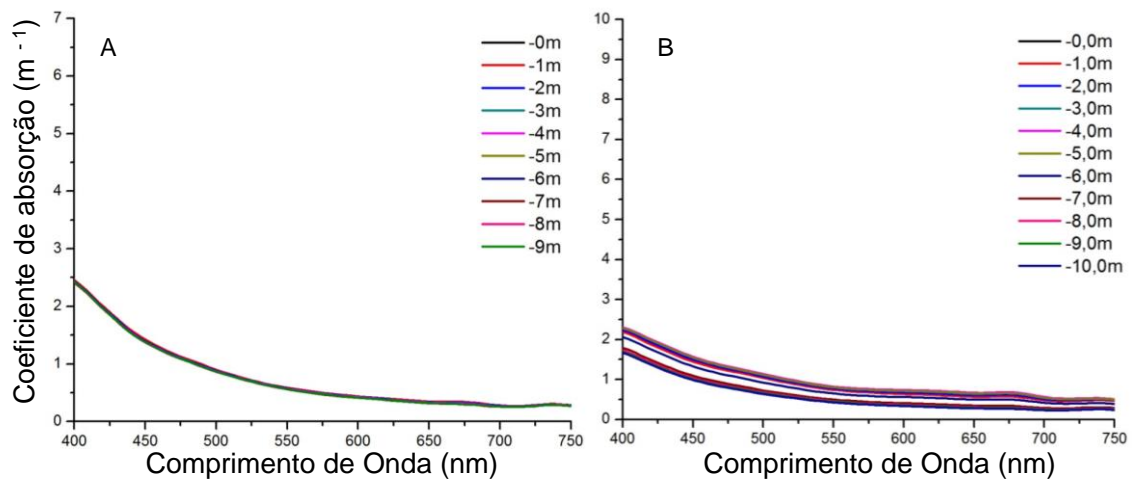


Figura A. 49: Coeficiente de absorção para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.

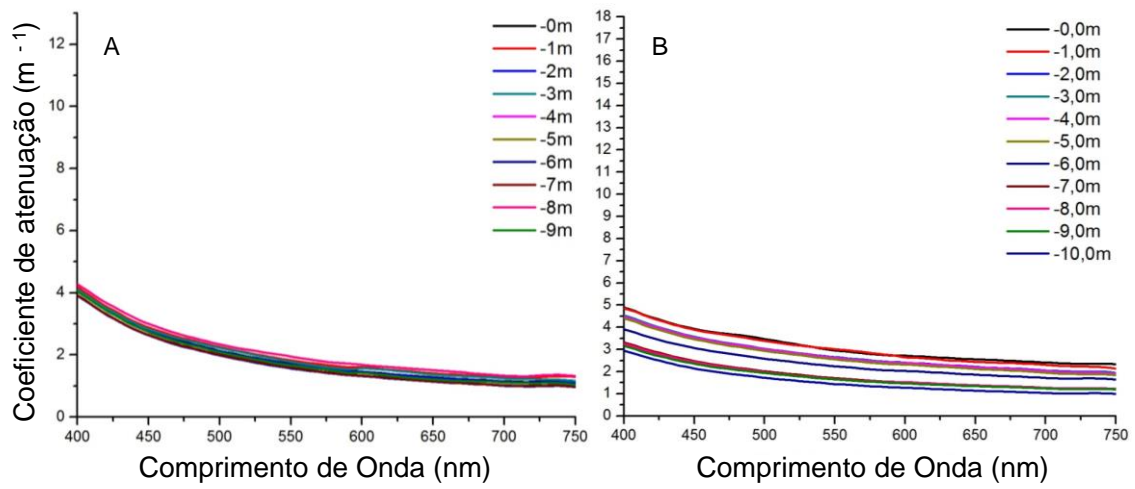


Figura A. 50: Coeficiente de atenuação para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.

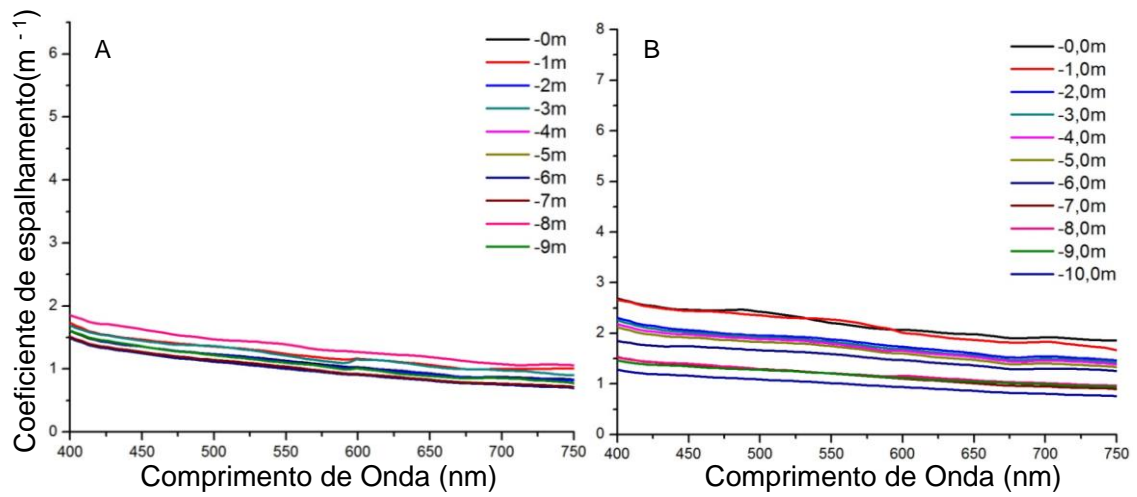


Figura A. 51: Coeficiente de espalhamento para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.

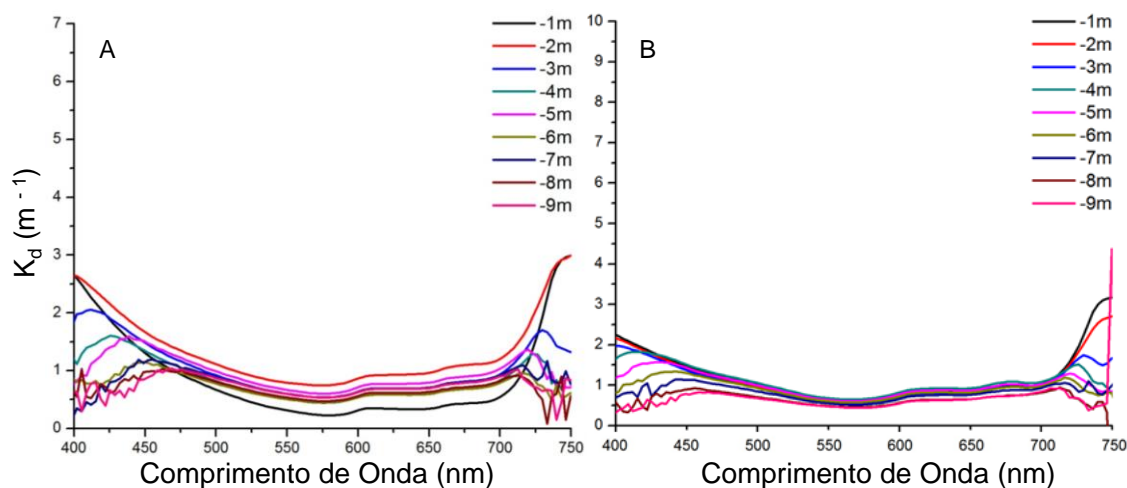


Figura A. 52: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.

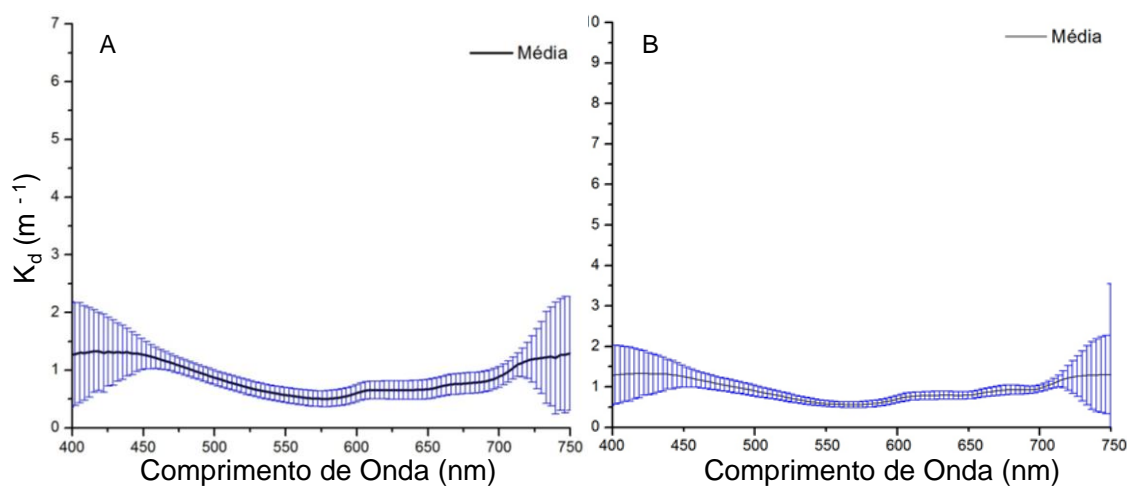


Figura A. 53: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.

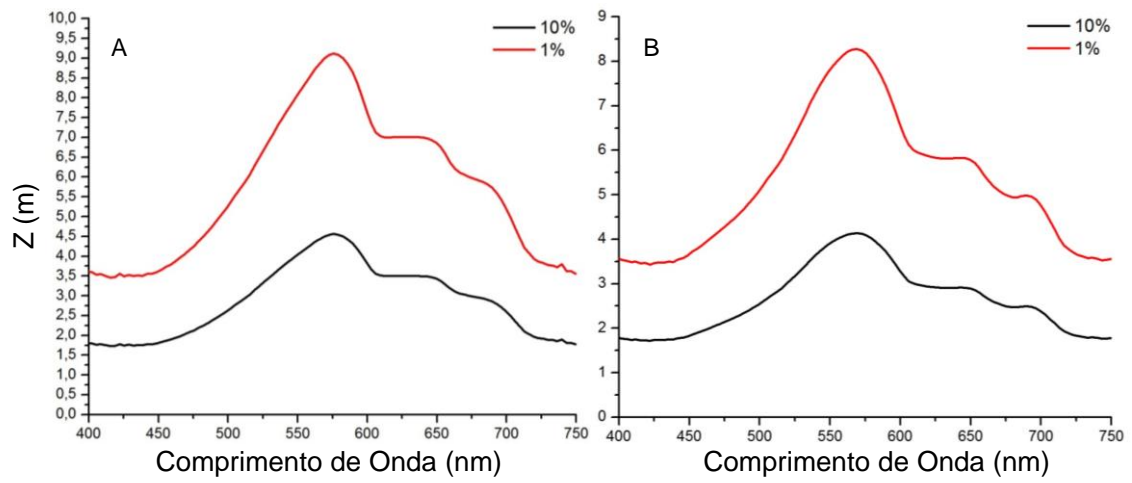


Figura A. 54: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.

## GRÁFICOS DO PONTO AMOSTRAL 29

Tabela A-7: Características gerais do ponto amostral 29.

Onde: Chl-a é a clorofila-a; Feo é a feofitina; MSI é o material em suspensão inorgânico; MSO é o material em suspensão orgânico; MST é o material em suspensão total; CID é o carbono inorgânico dissolvido; COD é o carbono orgânico dissolvido; CTD é o carbono total dissolvido; Profundidade é a profundidade da lâmina d'água local; Secchi é a medida do disco de secchi; O<sub>2</sub> é a porcentagem de oxigênio dissolvido na superfície da água; pH e turbidez são medidos na superfície da água; e o horário de aquisição é o momento no qual as medidas radiométricas foram iniciadas.

Ponto 29			
Parâmetro	Unidade	Maio	Set
[Chl-a]	µg.L <sup>-1</sup>	4,9	10,7
[Feo]		1,6	0
[MSI]		0,3	0,4
[MSO]		1,3	3
[MST]	mg.L <sup>-1</sup>	1,6	3,4
[CID]		4,3	4
[COD]		2,3	3
[CDT]		6,6	7
Profundidade	m	47,9	30
Secchi		2,3	2,2
O <sub>2</sub>	%	98,4	115,3
pH		6,79	8,53
Turbidez	ntu	2,7	2,8
Horário de aquisição	Horário de Brasília	13:33	10:36

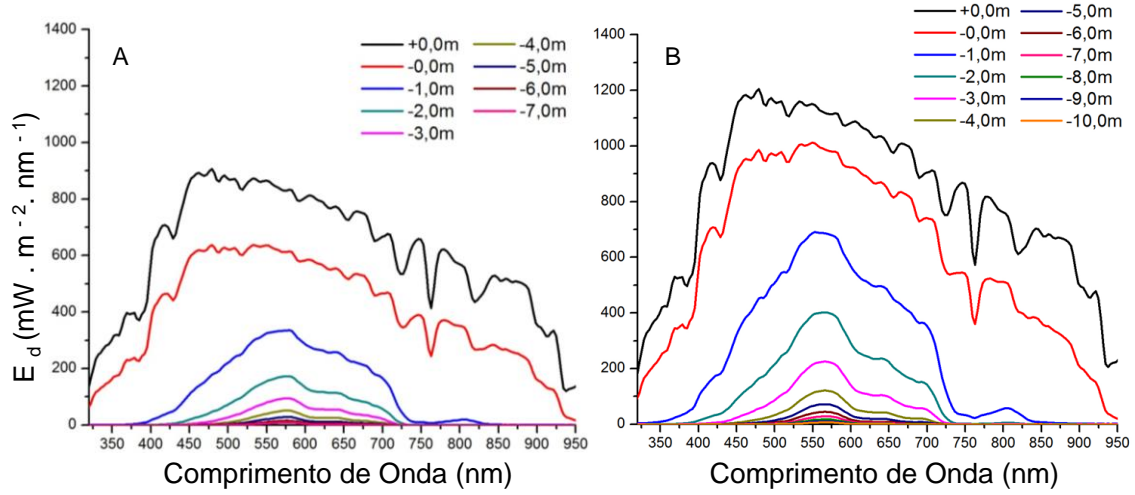


Figura A. 55: Irradiância descendente para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.

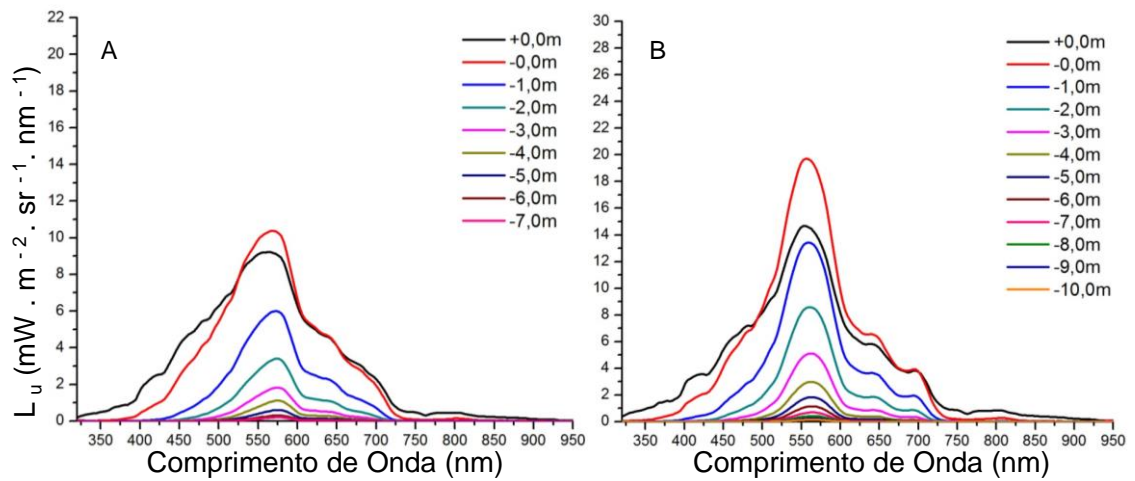


Figura A. 56: Radiância ascendente para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.



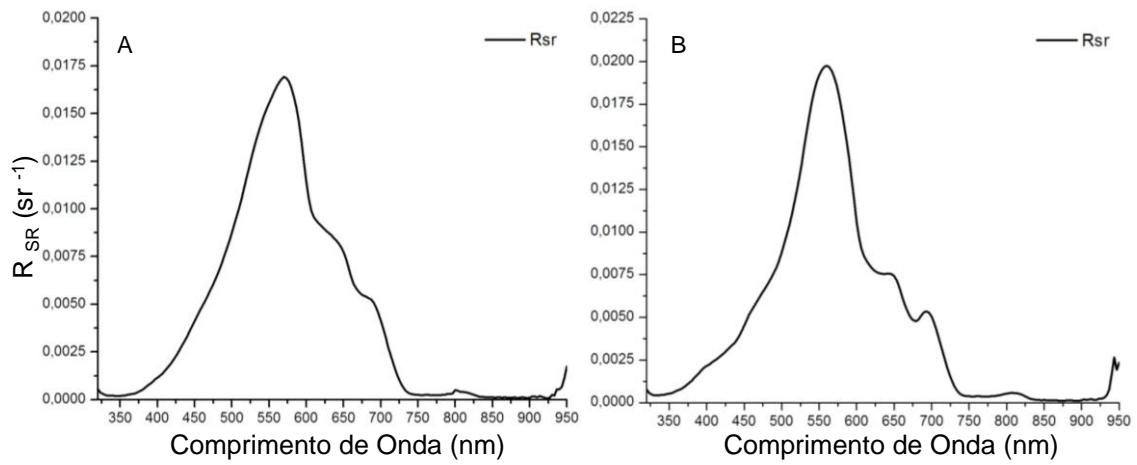


Figura A. 57: Reflectância de Sensoriamento Remoto para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.

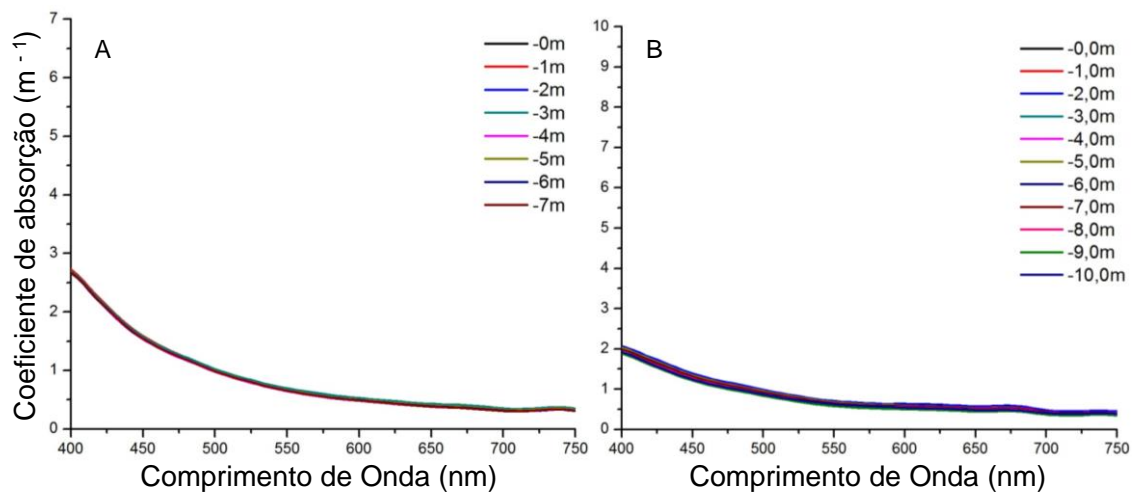


Figura A. 58: Coeficiente de absorção para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.

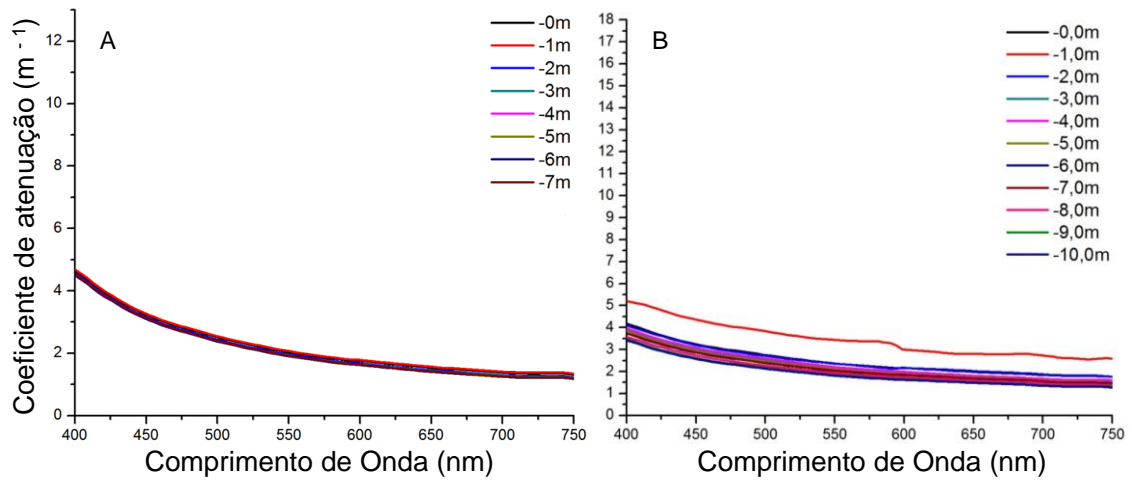


Figura A. 59: Coeficiente de atenuação para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.

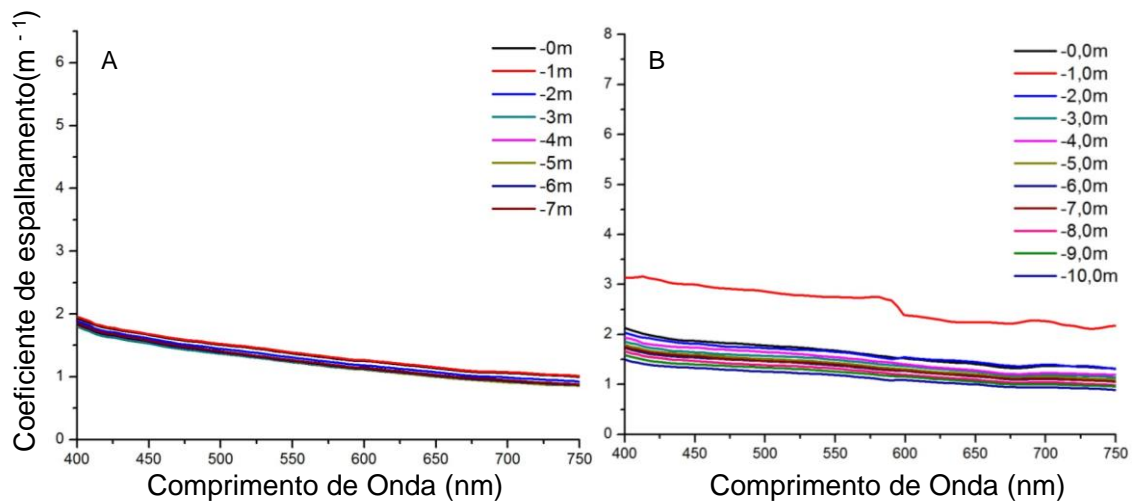


Figura A. 60: Coeficiente de espalhamento para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.

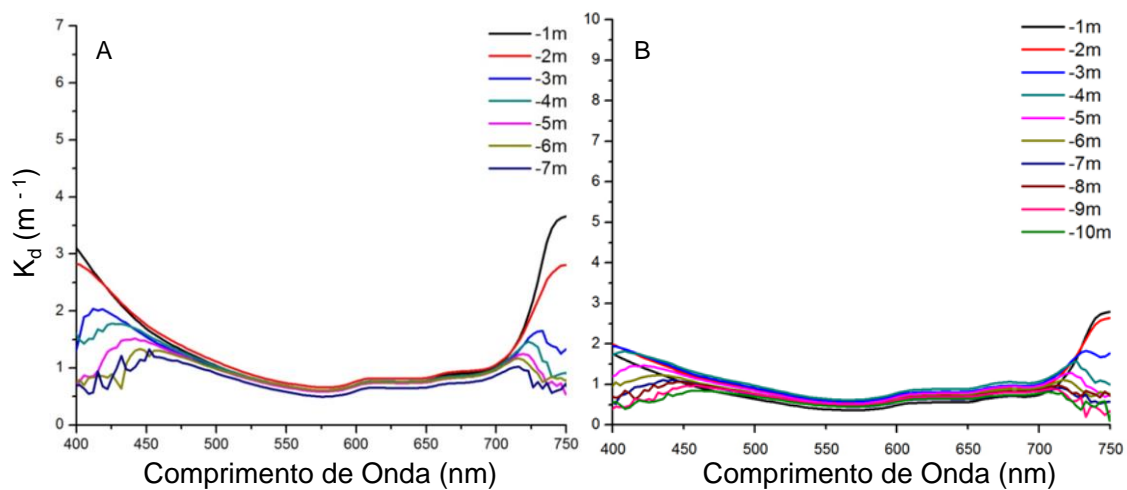


Figura A. 61: Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.

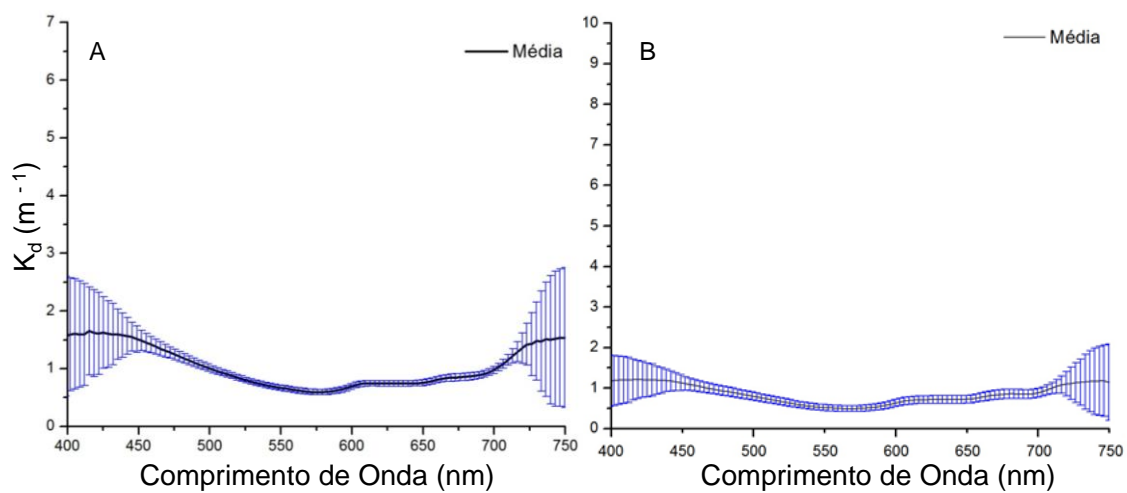


Figura A. 62: Média do Coeficiente de atenuação vertical difusa para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.

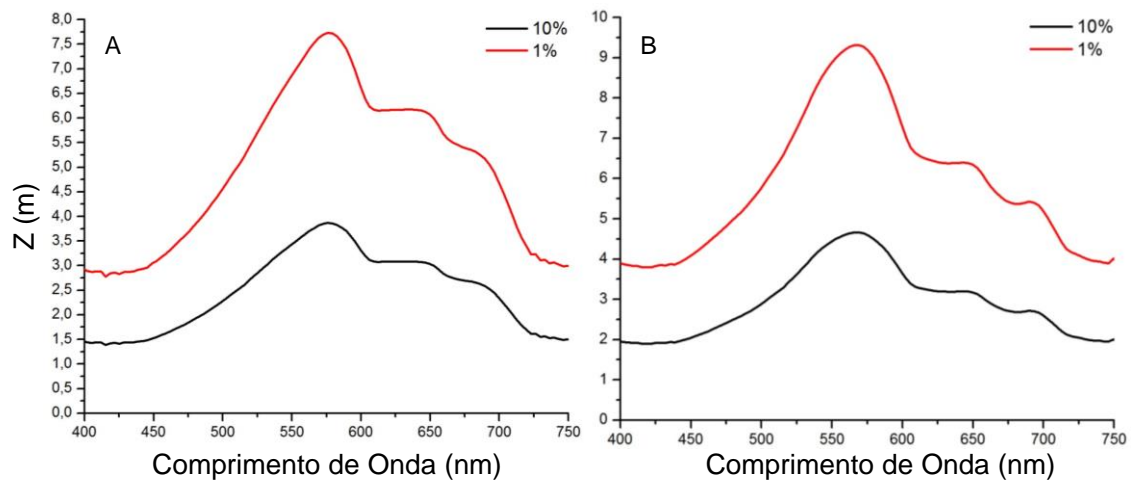


Figura A. 63: Profundidade espectral das camadas limite da zona eufótica para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.

## APÊNDICE B

### GRÁFICOS DOS MODELOS APLICADOS EM CADA PONTO AMOSTRAL

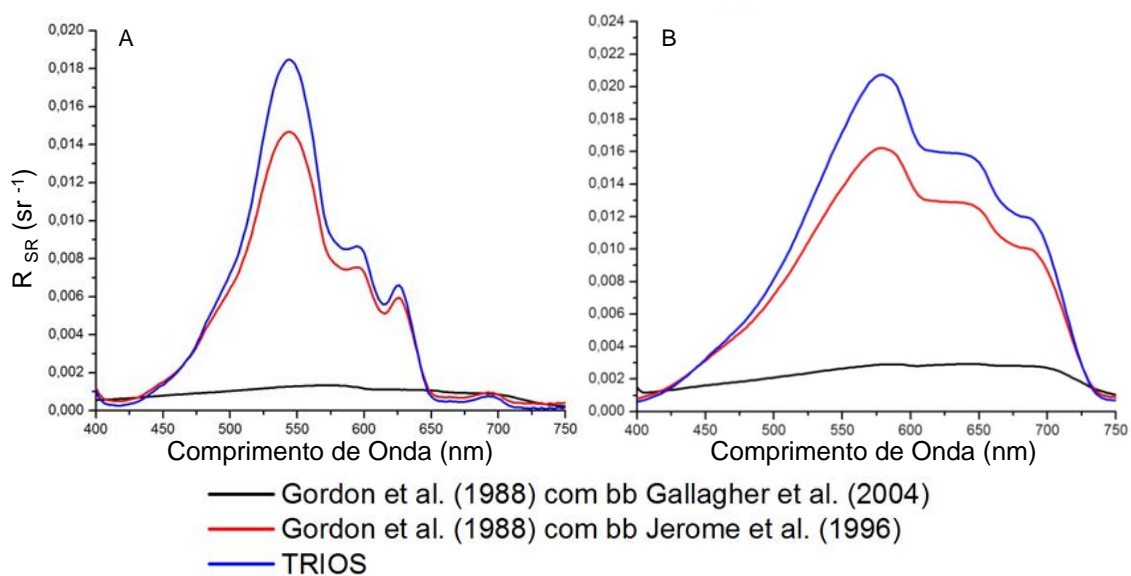


Figura B. 1: Modelos ópticos para o ponto 03 em: (A) Maio; (B) Setembro.

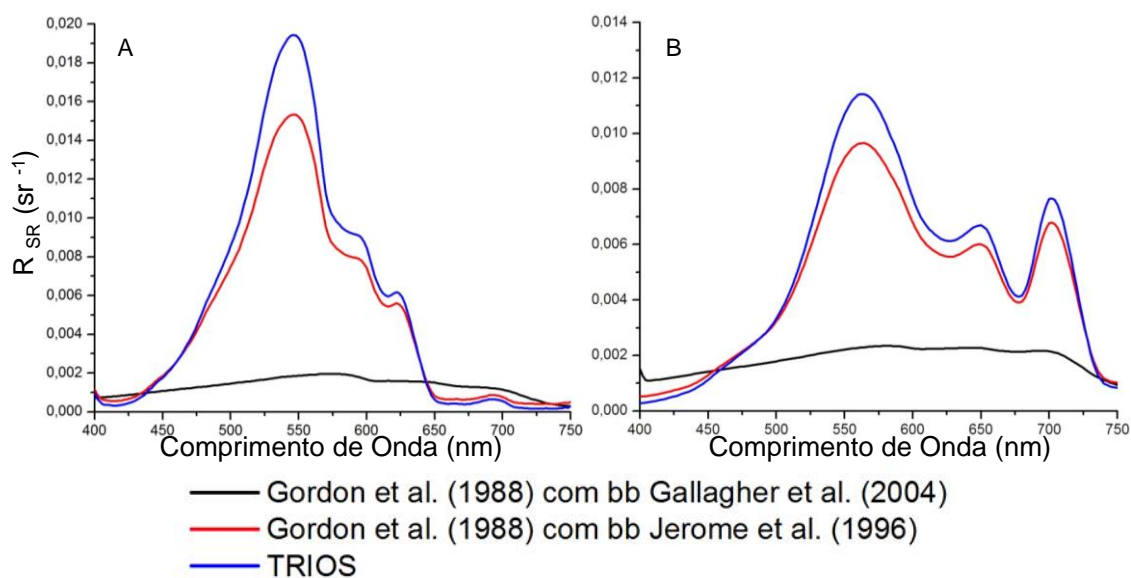


Figura B. 2: Modelos ópticos para o ponto 05 em: (A) Maio; (B) Setembro.

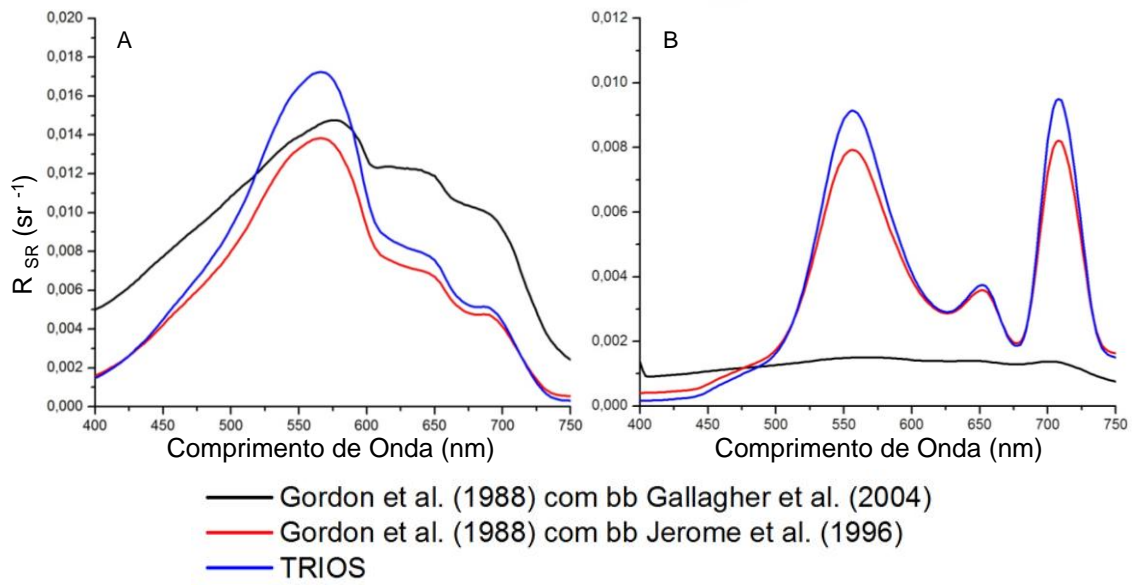


Figura B. 3: Modelos ópticos para o ponto 07 em: (A) Maio; (B) Setembro.

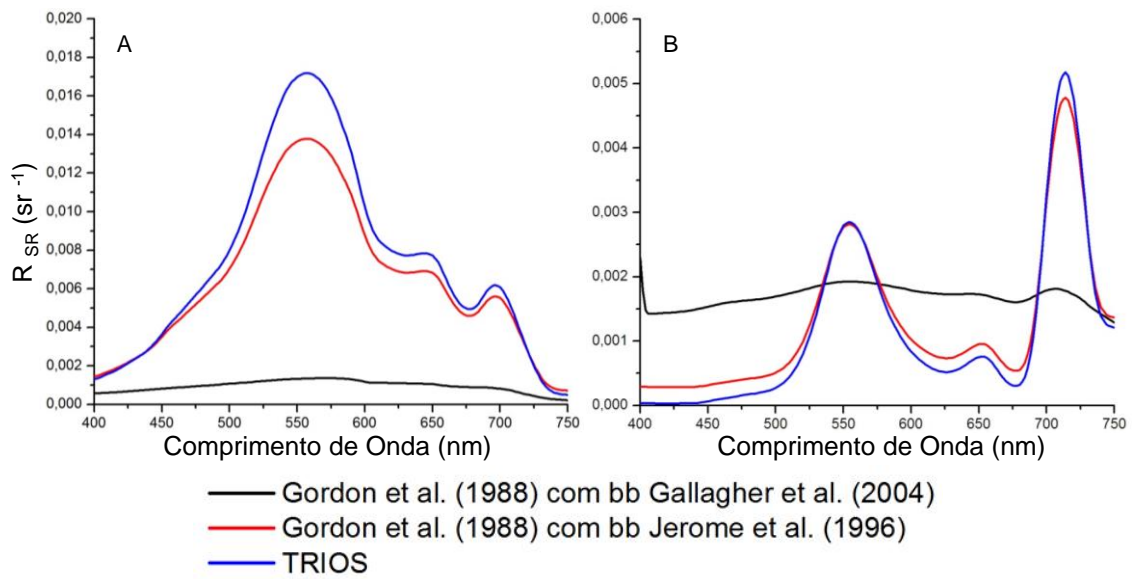


Figura B. 4: Modelos ópticos para o ponto 08 em: (A) Maio; (B) Setembro.

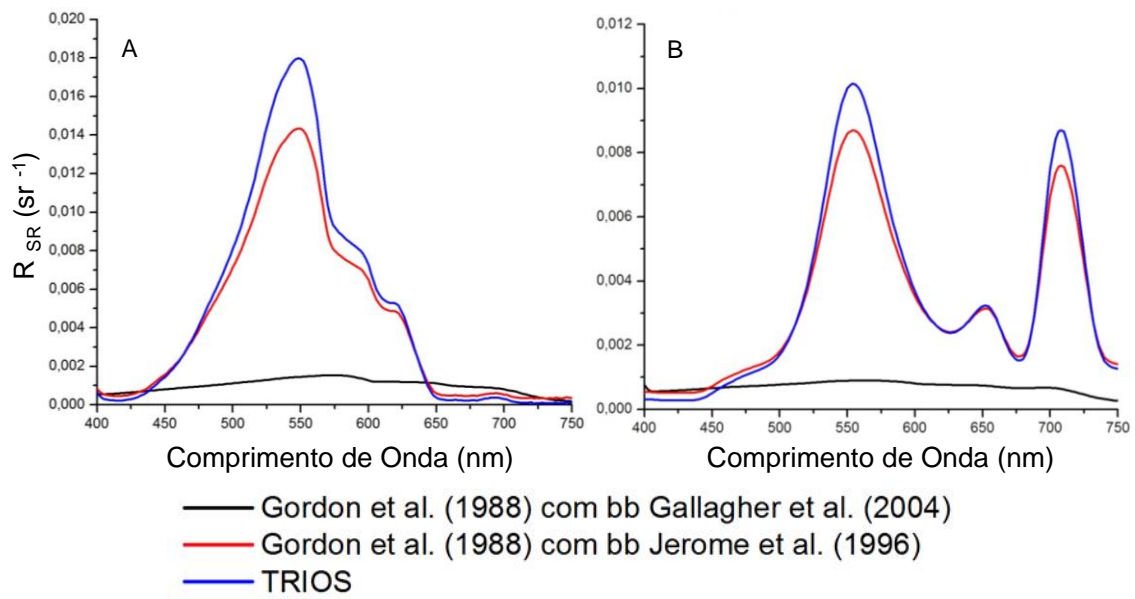


Figura B. 5: Modelos ópticos para o ponto 09 em: (A) Maio; (B) Setembro.

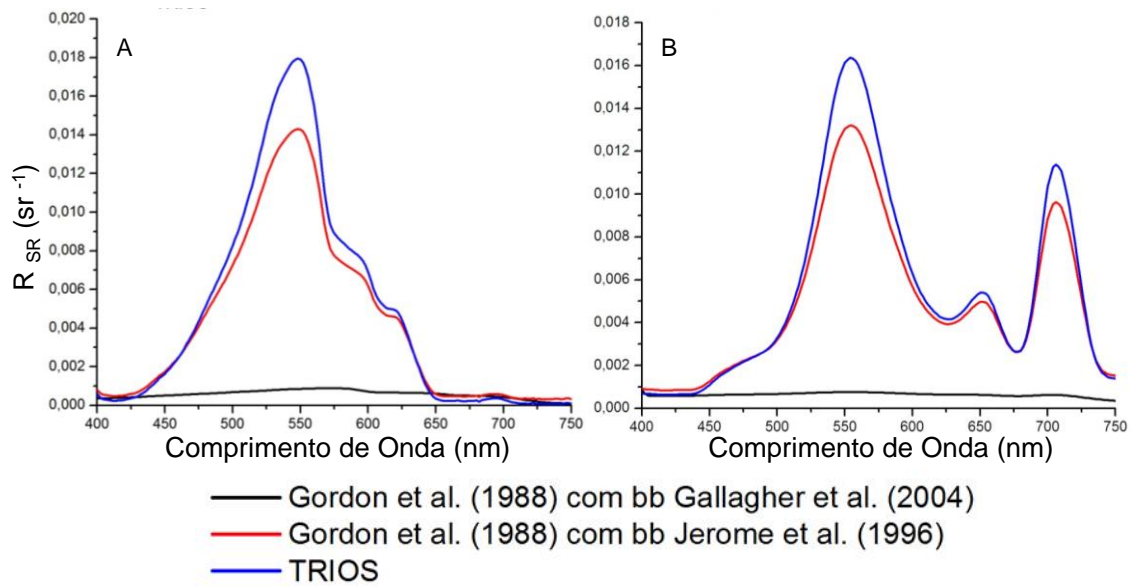


Figura B. 6: Modelos ópticos para o ponto 10 em: (A) Maio; (B) Setembro.

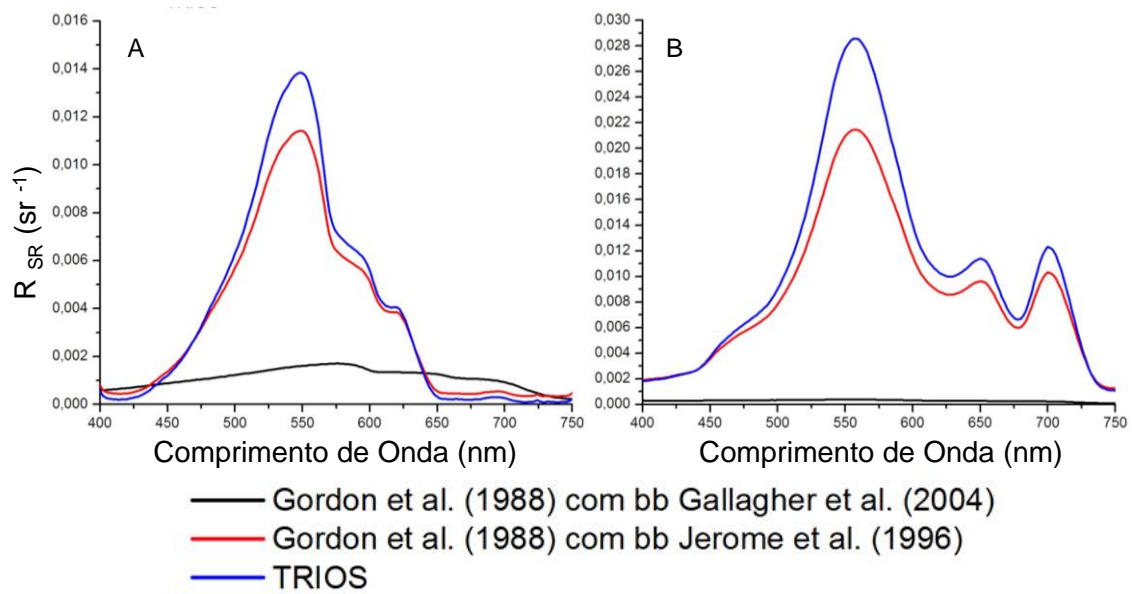


Figura B. 7: Modelos ópticos para o ponto 11 em: (A) Maio; (B) Setembro.

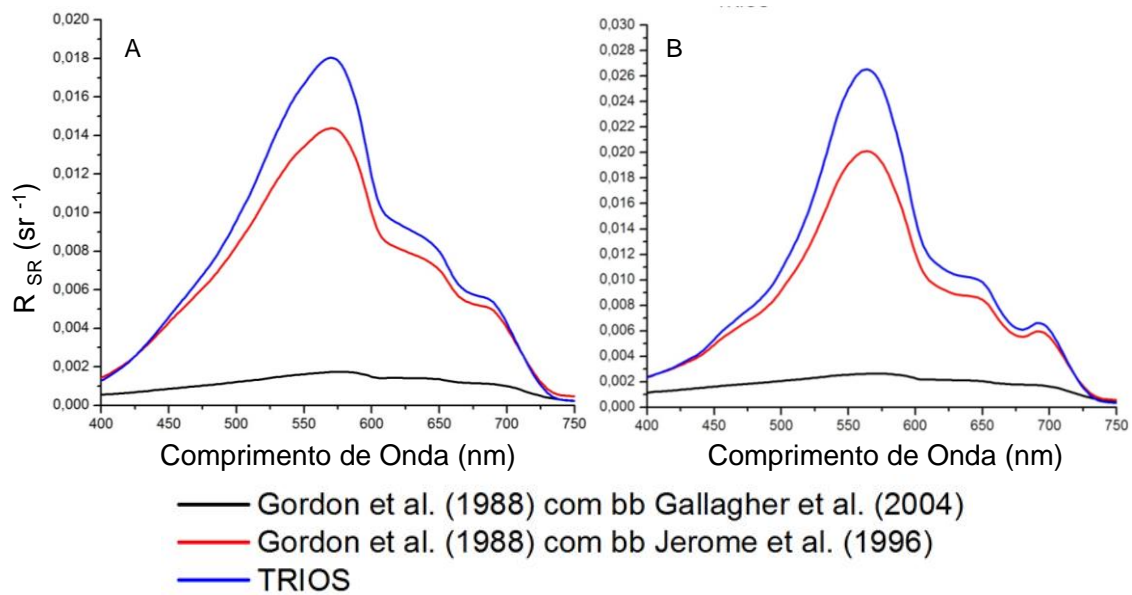


Figura B. 8: Modelos ópticos para o ponto 22 em: (A) Maio; (B) Setembro.



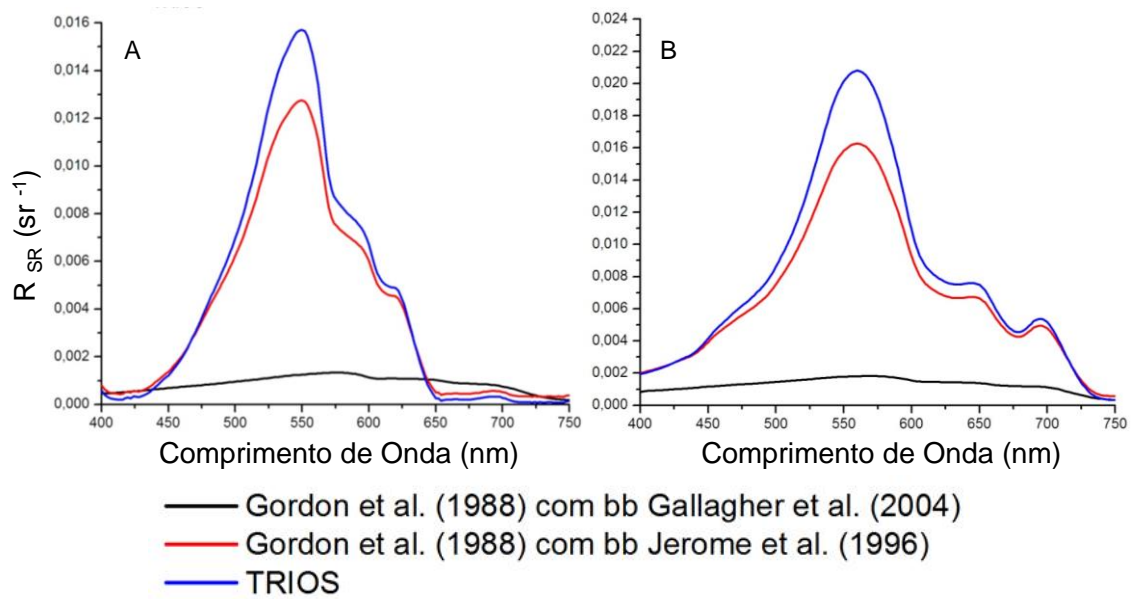


Figura B. 9: Modelos ópticos para o ponto 26 em: (A) Maio; (B) Setembro.

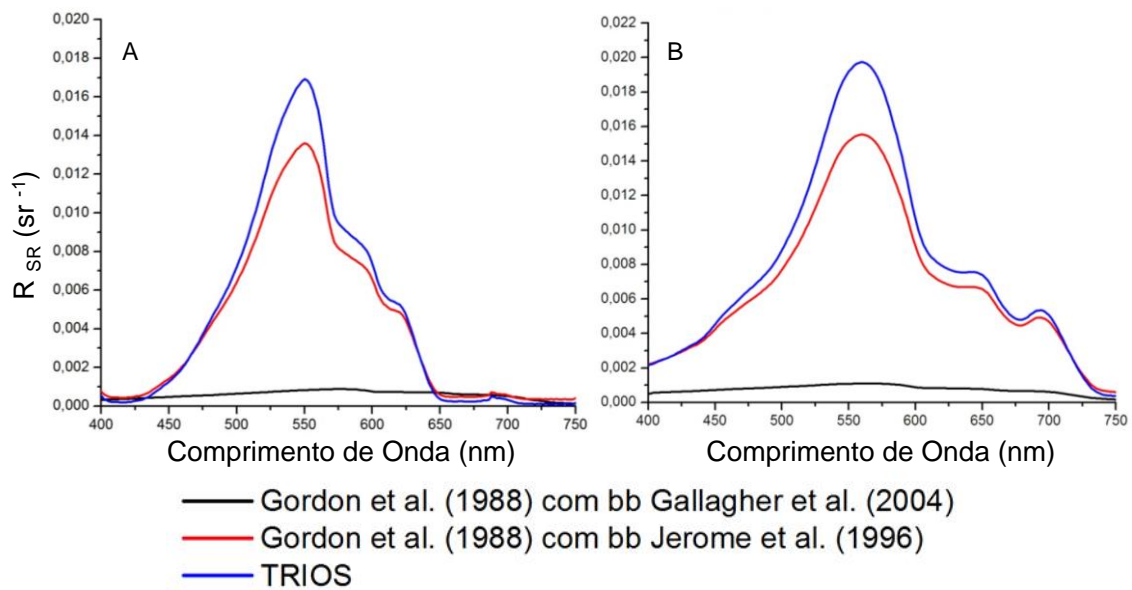


Figura B. 10: Modelos ópticos para o ponto 29 em: (A) Maio; (B) Setembro.