Variabilidade espectral da penetração da luz na coluna d'água na região de confluência entre os rios Tibagi e Paranapanema - PR

Alisson Fernando Coelho do Carmo[1], Nilton Nobuhiro Imai[1], Milton Hirokazu Shimabukuro[1]

[1] Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC)
Faculdade de Ciências e Tecnologias (FCT)
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP)
Presidente Prudente – SP – Brasil
alisondocarmo@gmail.com, {nnimai, miltonhs}@fct.unesp.br

Abstract. Remote sensing products applied in aquatic environments represent the interaction of electromagnetic radiation with the optically active components along the euphotic zone of the water column. Understand the light attenuation processes along the water column can be useful for the construction and improvement of bio-optics models. In this work we present a study focused on the energy behavior along the water column with the objective of comparing relationships between the spatial variation of light availability with the spatial distribution of the optically active components concentrations in a region of confluence between the Tibagi and Paranapanema Rivers, Paraná, Brazil. The results showed considerable homogeneity in the characteristics of water bodies, indicating predominance of dissolved materials. We cannot identify regions with significant variability in concentrations of optical active components so, we not be able to infer the validity of the hypothesis that the spectral range that defines the euphotic zone limit is variable and dependent on the water composition and distribution of its optically active components.

Keywords: Euphotic depth, Spectral and spatial variability, high turbid water Profundidade eufótica, Variabilidade espectral e espacial, Corpo dágua turbido

1. Introdução

Na utilização de sensoriamento remoto em corpos d'água, a onda eletromagnética interage com os componentes presentes no interior do corpo d'água, a partir do percurso na coluna d'água até a profundidade que o campo de luz é capaz de reagir, que é diretamente dependente do comprimento de onda a ser considerado (GORDON; MCCLUNEY, 1975). As imagens representam as características da composição da coluna d'água, em toda sua profundidade eufótica, de acordo com a classificação do corpo d'água, uma vez que a profundidade de penetração da luz é menor em águas túrbidas do que em águas claras (MCCLUNEY, 1974). No entanto, os valores tomados das imagens orbitais são tratados em conformidade a um plano e associados ao respectivo ponto/área da superfície, pois as diferentes interações ao longo da coluna d'água não podem ser decompostas e segmentadas precisamente em profundidade por meio de métodos de inversão de modelos bio-ópticos, uma vez que, geralmente, são ajustados a partir de amostragens na superfície.

Uma vez que a radiação eletromagnética interage em um espaço variável (a profundidade de penetração da luz depende da energia específica de cada intervalo espectral) e dinâmico (variabilidade dos componentes opticamente ativos), a resposta captada pelos sensores não representa apenas o valor associado apenas à superfície, e a calibração de modelos considerando somente os dados de amostragem em superfície pode não oferecer resultados efetivos. Portanto, sabendo que a pronfundidade de disponibilidade de luz varia de acordo com o comprimento de onda e que, geralmente, o limite da zona eufótica é adotado com uma relação direta e constante com o disco de secchi, o limite da zona eufótica é definido sempre pelo mesmo comprimento de onda do espectro eletromagnético?

A hipótese deste trabalho foi de que o intervalo espectral que atinge a máxima profundidade limite da zona eufótica é variável e diretamente dependente da composição da água e distribuição de seus componentes opticamente ativos. O principal objetivo foi comparar a variação espacial da disponibilidade de luz com a distribuição espacial das concentrações dos componentes opticamente ativos em uma partição de confluência entre os rios Tibagi e Paranapanema, que ocorrem no resevatório de Capivara.

A principal motivação deste trabalho ser direcionado a esta área de estudo deve-se ao fato de que os rios Tibagi e Paranapanema apresentam características distintas no que diz respeito à composição da água, possibilitando a exploração das características desta região de mistura e variabilidade longitudinal/volumétrica.

2. Materias e métodos

Para a comparação da variabilidade espacial do campo de luz com as concentrações dos Componentes Opticamente Ativos (COA) foram realizadas medidas radiométricas com um conjunto de espectroradiômetros e coletas de amostras de água em um total de quatorze pontos na área de confluência entre os rios Tibagi e Paranapanema que compreendem a formação do reservatório de Capivara, como pode ser visto na Figura 1.

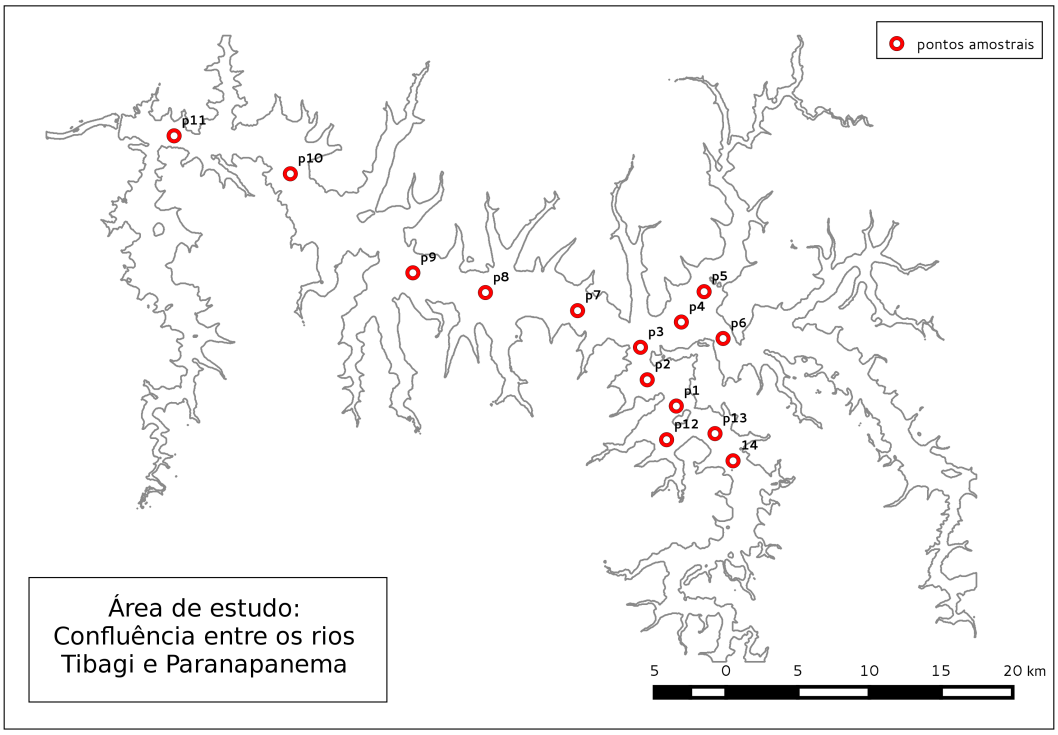

Figura 1: Delimitação da área de estudos e localização das estações amostrais

O levantamento dos dados foi realizado em duas campanhas de campo executadas em abril e julho de 2016. A campanha de maio contemplou um total de onze estações amostrais (pontos 1 a 11) nas quais foram realizadas medidas de profundidade de disco de secchi (Z_{SD}), profundidade do leito, velocidade do vento, radiometria acima da superfície da água (Espectrorradiômetro Handheld Fieldspec) e coletas de água em duas profundidades para extração de concentrações de Sólidos Totais em Suspensão (TSS) e Clorofila-A (Chla). Em sete desses pontos foram realizadas também coletas radiométricas ao longo da coluna d'água (Espectrorradiômetro TriOS Ramses) para aquisição de irradiância descendente (E_d), irradiância ascendente (E_u) e radiância

ascendente (L_u), enquanto fora d'água um dos radiômetros foi manuseado para coletar os valores de radiância do céu, alvo e superfície de referência (placa espectralon).

Posteriormente, visando a complementação do conjunto de dados e também para averiguação de possíveis alterações das características da água, foram amostrados oito pontos, sendo três deles em posições diferentes do primeiro conjunto, posicionados à montante do rio Tibagi. Nas estações amostrais realizadas na campanha de julho, foram realizadas medidas de: profundidade de disco de secchi, profundidade do leito, velocidade do vento, velocidade do curso do rio (fluxo medido com molinete) e coletas de água em duas profundidades para extração de concentrações e coeficientes de absorção de TSS, Chla e Material Orgânico Dissolvido Colorido (CDOM).

O diagrama apresentado na Figura 2 destaca as etapas do método aplicado neste trabalho. Os principais objetos de estudo neste método são os valores de irradiância descendente (E_d), a partir do qual é possível obter outras propriedades opticas do ambiente. Outras variáveis pontuais, como as concentrações dos componentes opticamente ativos, profundidade de disco de secchi e velocidade do fluxo da água foram importantes para apoiar a análise dos resultados e explanação conclusivas.

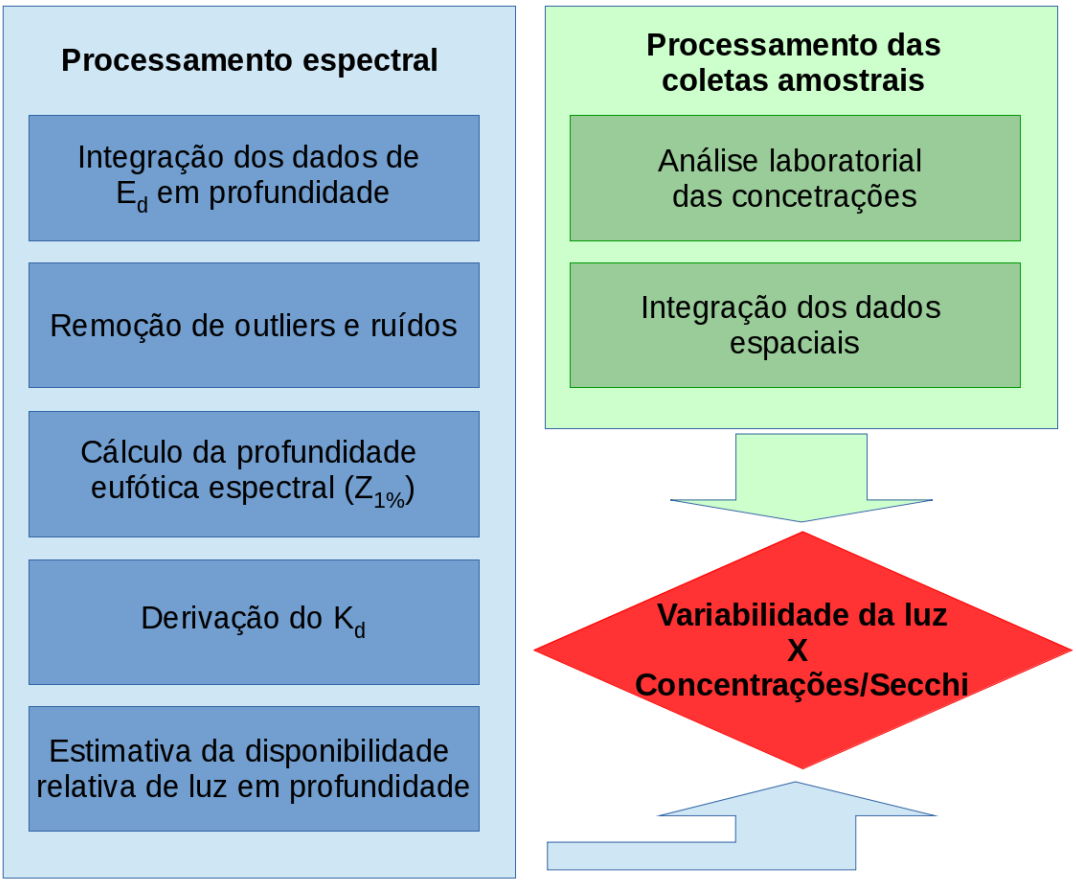

Figura 2: Fluxo de execução do método

2.1. Processamento dos dados espectrais

O principal interesse deste trabalho é a investigação do comportamento da zona eufótica definida pela profundidade limite na qual é obtida 1% da energia disponível. Para isto, foi considerada a atenuação da luz dentro da coluna d'água relativa à primeira medida realizada próximo da superfície. Para a normalização, foi adotado um fator de correção para cada

conjunto de medidas em razão da possível variabilidade da radiação eletromagnética disponível em relação ao tempo de realização das medidas, ocasionados por fatores atmosféricos, principalmente cobertura de nuvens ((MUELLER, 2003), (MISHRA et al., 2005)).

O radiômetro modelo TriOS-SAMIP utilizado neste trabalho para realizar as medidas da irradiância descendente (E_d) abaixo da superfície da água possui sensor de pressão e inclinação integrados. A profundidade foi estimada a partir da leitura de pressão armazenada pelo sensor. Em razão da aplicação neste trabalho ser em águas interiores que possuem limite eufótico reduzido, na qual uma alta precisão da profundidade não é crucial, foi utilizada a aproximação para o cálculo da profundidade de acordo com a equação 1:

$$Depth(m) = 1,019716 \times pressure(100hPa) \tag{1}$$

As medidas de perfil dos radiômetros foram realizadas de modo contínuo, onde a velocidade de deslocamento foi controlada pelo manuseio do próprio operador. A frequência de amostragem dos valores radiométricos varia de acordo com a disponibilidade de luz em cada medida, pois depende do tempo de integração necessário para captura da energia, podendo variar até o máximo oito segundos entre cada coleta. A velocidade de medida foi determinada de modo a obter ao menos uma medida a cada dez centímetros da coluna d'água.

As ondas e o balanço do barco resultam em alterações do campo de visada dos sensores e podem inserir ruídos nos dados espectrais. A remoção dos ruídos foi realizada a partir da aplicação de uma média móvel com janela central de dez posições. Após aplicação da correção, as curvas espectrais foram suavizadas e os picos foram eliminados sem a perda de suas respectivas formas espectrais.

A profundidade da zona eufótica ($Z_{1\%}$ ou Z_{eu}) indica a profundidade em que a radiação eletromagnética fotossinteticamente ativa (PAR - *Photosynthetically Active Radiation*) atinge 1% daquela disponível na superfície ((KIRK, 1994), (LEE et al., 2007)). Para obtenção de $Z_{1\%}(\lambda)$ um algoritmo foi desenvolvido e aplicado para selecionar as profundidades limites de 1% da energia disponível na superfície para cada estação amostral, considerando o intervalo de 400 à 800 nanômetros. Ao final deste processo, a curva espectral da zona eufótica foi definida para cada ponto amostral.

Com as profundidades da zona eufótica indentificadas, os valores espectrais do coeficiente de atenuação vertical (K_d) foram obtidos a partir do desenvolvimento da equação básica que relaciona a atenuação da luz ao longo do corpo d'água, descrito pela equação 2 ((KIRK, 1994)).

$$E_d(\lambda, Z) = E_d(\lambda, 0)^{-K_d Z} \tag{2}$$

Desenvolvendo algebricamente a equação 2, é possível obter os valores de Kd relacionados a cada profundidade limitante da zona eufótica, como indicado na equação 3

$$\begin{aligned} E_d(\lambda, Z) = E_d(\lambda, 0)^{-K_d Z} \Rightarrow \ln E_d(\lambda, Z) = -K_d Z \ln E_d(\lambda, 0) \Rightarrow \\ K_d = -\frac{1}{Z} \times \frac{\ln E_d(\lambda, Z)}{\ln E_d(\lambda, 0)} \end{aligned} \tag{3}$$

2.2. Processamento das amostras de água

As amostras de água foram coletadas em duas profundidades, uma próxima da superfície da água e a outra ao final estimado da zona eufótica (por meio da aproximação $Z_{eu} = 3.0 \times Z_{SD}$ (HOLMES, 1970)) utilizando uma garrafa de Van Dorn. Em cada um desses pontos foram coletados cinco litros de água, dentre os quais, 400 ml foram filtrados para cada extração das concentrações de Chla, TSS e CDOM. Para a extração das concentrações de Chla e TSS,

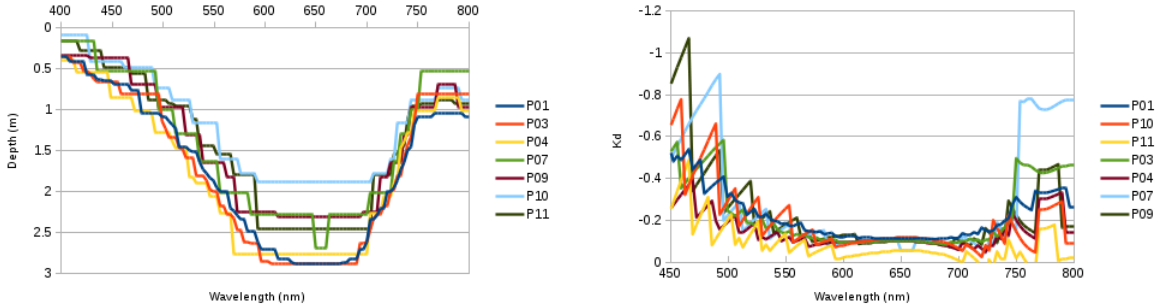

Figura 3: Relações considerando a disponibilidade mínima de 1% de luz, na esquerda consta a profundidade limite de cada ponto, e na direita as curvas espectrais do Kd para cada ponto

foram utilizados filtros de fibra de vidro modelo GF/F 0,7 mícrons (previamente secos em um forno a 105°C e então queimados em uma mufla a 550°C para TSS). Filtros de 0,2 mícrons foram utilizados para retenção de partículas suspensas da água para permitir posterior análise de CDOM via espectrofotômetro.

A velocidade do fluxo dos rios foi medida com o auxílio de um molinete. Molinete é um dispositivo mecânico formado por uma pequena hélice, que é submergido na coluna d'água para girar de acordo com o fluxo do local. A quantidade de giros da hélice pode ser relacionada com a velocidade da água usando a equação constante do molinete. Cada equipamento tem sua constante específica fornecida pelo fabricante.

Os dados de TSS, Chla, velocidade da água e profundidade do disco de secchi foram interpolados espacialmente na área de interesse. A interpolação dos dados foi realizada a partir do método IDW (*Inverse Distance Weighting*).

3. Resultados

As curvas de penetração de luz que definem a profundidade da zona eufótica, bem como a do comportamento espectral do K_d, foram calculadas para cada ponto amostral. Nestas curvas, apresentadas na Figura 3 não foram aplicadas qualquer tipo de processamento para suavização ou remoção de ruídos, pois tais características podem trazer consigo informações importantes sobre o comportamento do campo de luz ao longo da coluna d'água.

Os pontos amostrais apresentaram comportamentos similares nas caraterísticas de atenuação da luz. Tal semelhança pode ser destacada ao considerar a curva de $E_d(PAR)$ para cada ponto, como pode ser visto na Figura 4. Estas curvas são formadas a partir do somatório dos valores de irradiância descendente em todo espectro fotossintiteticamente ativos (PAR) em uma determinada profundidade para cada ponto.

Para melhorar a visualização e interpretação dos dados, na Figura 4 consta um recorte em destaque da janela do gráfico no qual ocorrem as características mais significativas: disponibilidade de luz próximo da superfície (Profundidade = 0m) e profundidade com a qual se encontra a mínima quantidade de luz (Luz disponível = 0%).

Os demais dados coletados foram interpolados espacialmente para a construção dos mapas apresentados na Figura 5. Foram gerados mapas relacionados à variação de clorofila a, total de sólidos em suspensão na superfície e em profundidade de dois metros, profundidade do disco de secchi e velocidade do fluxo da água. Em todos os mapas, o algoritmo de ponderação pelo inverso da distância foi utilizado para espacialização dos dados.

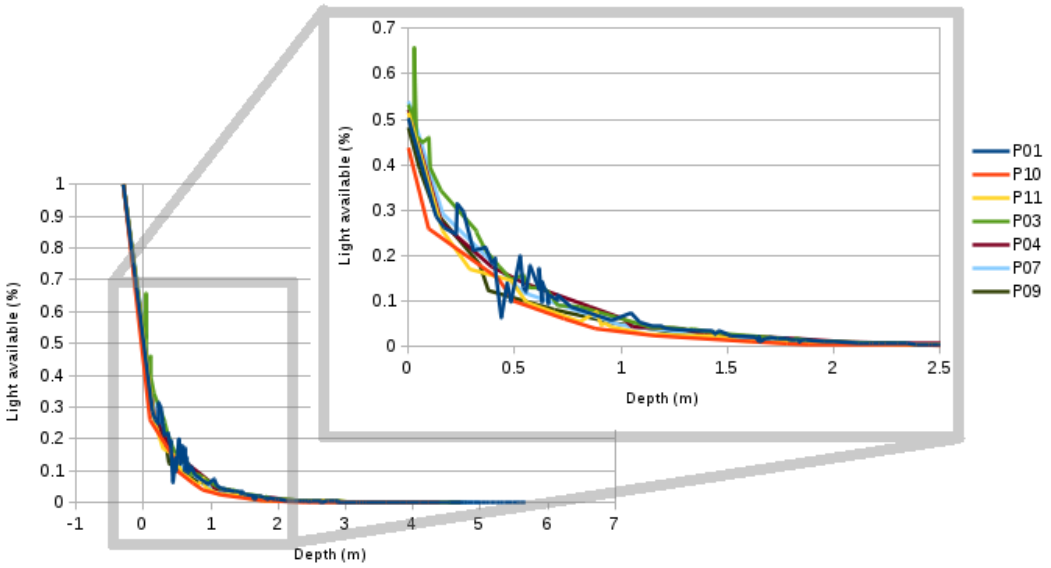

Figura 4: Disponibilidade totais relativas da luz $E_d(PAR)$ na coluna d'água

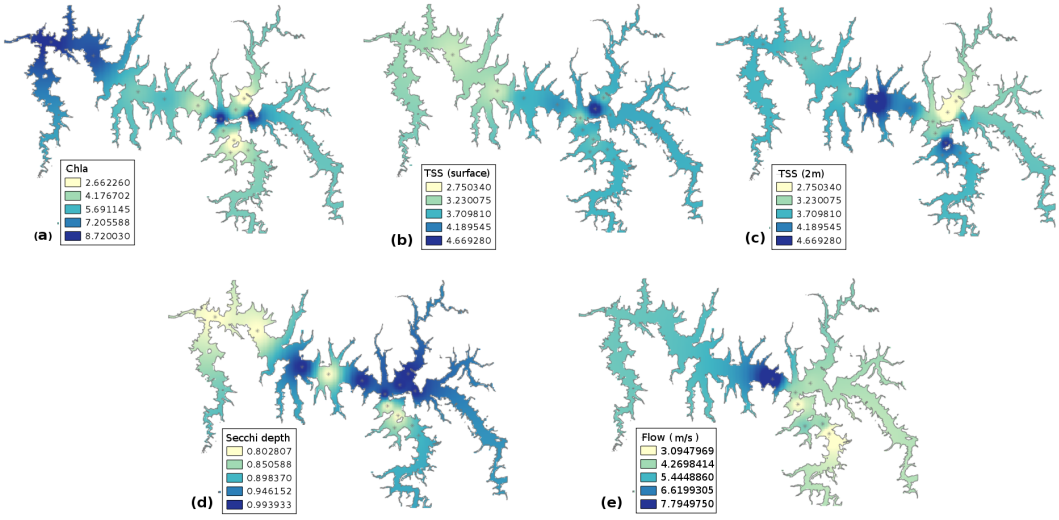

Figura 5: Mapas interpolados pelo algoritmo IDW: (a) Clorofila-A; (b) Total de sólidos em suspensão medidos na superfície; (c) Total de sólidos em suspensão medidos à 2 metros de profundidade; (d) profundidade do disco de secchi e em (e) velocidade do fluxo da água

4. Discussão

A coleta dos dados radiométricos ocorreu entre os horários de 11:30h e 15:30h. Por esta razão, houve alteração no ângulo de elevação solar, influenciando diretamente a quantidade de energia disponível em cada medida, além da própria variação de energia durante a execução de cada coleta decorrente de fatores atmosférico como cobertura de nuvens. A normalização dos dados foi realizada a partir do cálculo de um fator de correção entre as medidas, considerando a primeira como referência.

A atenuação da energia não é constante ao longo de todo o espectro, de forma que

determinados intervalos espectrais possuem uma atenuação maior e atingem o limite mínimo de energia mais rapidamente. Tal fato ocorre em razão da atenuação da luz ser diretamente dependente do comprimento de onda. Como pode ser visto na Figura 3, a profundidade máxima de penetração da luz varia de acordo com o comprimento de onda relacionado e em todos os pontos amostrados, existe um comportamento semelhante na atenuação do campo de luz na coluna d'água, destacado tanto pela profundidade máxima espectral da zona eufótica (Figura 3) quanto pelos valores espectrais de atenuação vertical difusa (Figura 3).

A semelhança da redução de energia em diferentes pontos do conjunto de amostras indica que a água possui caracterísitcas semelhantes relacionadas à atenução da luz ao longo do reservatório. Por se tratar de uma região com características lênticas, associadas ao alagamento causado pelo represamento do rio e confirmadas a partir dos baixos valores de velocidade da água apresentadas na Figura 5(e), não existe grande variação na composição da água. Este comportamento homogêneo pode ser verificado observando os baixos valores de concentrações de TSS (2.7 a 4.6 mg/L) e Chla (2.6 a 8.6 mg/L), indicando, possivelmente, alta concentração de CDOM, em razão da coloração e nível de turbidez da água (profundidade de secchi média de 80 cm).

Os menores valores de atenuação da luz, que atingiram a maior profundidade da zona eufótica, foram encontrados no intervalo do espectro relacionado à coloração alaranjada, concentrados na faixa de 650 nanômetros. Tal fato está diretamente relacionado com a cor da água que foi vista durante a realização das campanhas de campo, como pode ser visto na Figura 6, na qual apresenta uma comparação da cor da água de acordo com a escala Forel-Ule ((WERNAND; WOERD, 2010b), (WERNAND; WOERD, 2010a)).

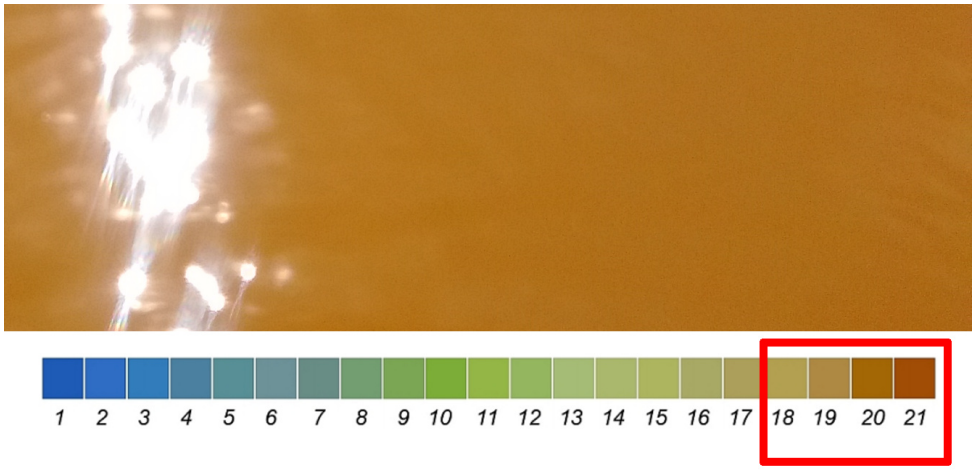

Figura 6: Cor da água vista durante a realização da campanha de campo em comparação com a escala Forel-Ule. O intervalo com maior proximidade da escala Forel-Ule está destacado

Observando a escala Forel-Ule é possível atestar uma associação aproximada na região da escala de 18 a 21. Neste intervalo, de acordo com as definições da escala, tal classificação representa uma porção de água com altas concentrações de ácidos húmicos, que é uma característica típica de rios e estuários que apresentam altas concentrações de CDOM ((WERNAND; WOERD, 2010b)).

5. Conclusões

Os resultados obtidos expressam uma alta homogeneidade das características do corpo d'água expressada por meio dos baixos valores de concentrações de TSS e Chla, na qual a

coloração túrbida apresentada indica, possivelmente, a existência de altas concentrações de materiais orgânicos dissolvidos.

Em razão da pouca varibilidade dos dados amostrados, não foi possível inferir diretamente sobre a validade da hipótese de que os limites da zona eufótica são variáveis e diretamente dependentes do nível de concentrações dos componentes opticamente ativos. No entanto, o fato da coloração da água ter apresentado relação com o comprimento de onda associado à máxima profundidade de penetração da luz e mínimo valor de atenuação vertical (K_d), pode ser indicativo de que esta hipótese seja verdadeira. Uma vez que o corpo d'água se mostrou predominantemente influenciado por materiais dissolvidos, e que estes apresentam uma homegeneidade maior quando comparado aos outros componentes opticamentes ativos, os comportamentos relacionados à penetração e atenuação da luz no corpo d'água são condizentes com o esperado, pois, composições semelhantes e homogêneas acarretam em comportamentos similares na interação com a energia eletromagnética.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia/UNESP (FCT/UNESP)- Campus de Presidente Prudente - por permitir o desenvolvimento desta investigação; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro dedicado ao projeto.

Referências

GORDON, H. R.; MCCLUNEY, W. R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Appl. Opt.*, OSA, v. 14, n. 2, p. 413–416, Feb 1975. Disponível em: <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-14-2-413>.

HOLMES, R. W. The secchi disk in turbid coastal waters. *Limnol. Oceanogr*, v. 15, n. 5, p. 688–694, 1970.

KIRK, J. T. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. [S.l.]: Cambridge university press, 1994.

LEE, Z. et al. Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 112, n. C3, 2007.

MCCLUNEY, W. Estimation of sunlight penetration in the sea for remote sensing. 1974.

MISHRA, D. R. et al. Characterizing the vertical diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance in coastal waters: Implications for water penetration by high resolution satellite data. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, Elsevier, v. 60, n. 1, p. 48–64, 2005.

MUELLER, J. L. In-water radiometric profile measurements and data analysis protocols. *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision*, v. 4, p. 7–20, 2003.

WERNAND, M.; WOERD, H. Van der. Ocean colour changes in the north pacific since 1930. *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, v. 5, 2010.

WERNAND, M. R.; WOERD, H. J. van der. Spectral analysis of the forel-ule ocean colour comparator scale. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, v. 5, n. 0, 2010. ISSN 1990-2573. Disponível em: $<http://www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/10014s>$.