



## RELAÇÃO ENTRE TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA E A REFLECTÂNCIA DA IMAGEM LANDSAT 5 TM DO RESERVATÓRIO PASSO REAL

Felipe Correa dos Santos<sup>1</sup>, Gustavo Rodrigues Toniolo<sup>2</sup>, Waterloo Pereira Filho<sup>3</sup>

(1 – Universidade Federal de Santa Maria, Pós-Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia, [felipecorrea\\_rs@hotmail.com](mailto:felipecorrea_rs@hotmail.com); 2 – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, [gustavotoniolo1@gmail.com](mailto:gustavotoniolo1@gmail.com); 3 – Universidade Federal de Santa Maria, Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Geografia, [waterloopf@gmail.com](mailto:waterloopf@gmail.com)).

**Resumo:** A presente pesquisa verificou a relação entre dados de transparência da água identificados em campo e os valores de reflectância espectral do reservatório Passo Real obtidos por imagem Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) 5 TM (*Thematic Mapper*). A transparência da água foi medida em campo com o uso de um disco de Secchi em 31 pontos amostrais do reservatório. As imagens de satélite utilizadas para a análise temporal da reflectância da água foram produzidas pelo satélite Landsat 5 TM. Os processamentos das imagens para correção dos efeitos atmosféricos e transformação dos números digitais em valores de reflectância foram realizados no *software* ENVI 5.0. As espacializações dos dados de transparência e dos valores de reflectância foram realizadas por interpolação no *software* Spring 4.3.3. Os dados de reflectância no contexto espaço-temporal indicam que as principais alterações correspondem aos setores dos tributários do reservatório Passo Real. Os dados espectrais da Banda 3 do sensor TM foram relacionados com a variável transparência da água nos 31 pontos amostrais. Os modelos gerados por regressão linear demonstram que a transparência da água apresenta correlação significativa com os dados de reflectância na região espectral do vermelho.

**Palavras-chave:** transparência da água, reflectância espectral, reservatório.

## RELATION BETWEEN WATER TRANSPARENCY AND THE REFLECTION OF THE LANDSAT 5 TM IMAGE OF THE PASSO REAL RESERVOIR



**Abstract:** The present research verified the relationship between water transparency data identified in situ and the values of spectral reflection of the Passo Real Reservoir obtained through Landsat 5 images. The water transparency was measured in situ with the use of a Secchi disc in 31 sample points of the reservoir. The satellite images used for the temporal analysis of the water reflection were produced by the Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) 5 TM (*Thematic Mapper*). The image processing for the correction of atmospheric effects and the transformation of digital numbers into reflection values were done with the ENVI 5.0 software. The spacings of the transparency data and reflection values were done by the interpolation in the Spring 4.3.3 software. The reflection data in the space-temporal context indicates that the main alterations correspond to the tributary sectors of the Passo Real Reservoir. The spectral data of the Band 3 of the TM sensor were related with the water transparency variable in the 31 sample points. The models generated by linear regression showed that the water transparency have significant correlation with the reflection data in the red region.

**Keywords:** water transparency, spectral reflection, reservoir.

## RELACIÓN ENTRE TRANSPARENCIA DEL ÁGUA Y LA REFLECTANCIA DE LA IMAGEN LANDSAT 5 TM DEL EMBALSE PASSO REAL

**Resumen:** La presente investigación verificó la relación entre los datos de transparencia del agua identificados en el campo y los valores de reflectancia espectral del embalse Passo Real obtenidos por imagen Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) 5 TM (*Thematic Mapper*). La transparencia del agua se midió en el campo con el uso de un disco Secchi en 31 puntos de muestreo en el embalse. Las imágenes satelitales utilizadas para el análisis temporal de la reflectancia del agua fueron producidas por el satélite Landsat 5 TM. El procesamiento de imágenes para la corrección de efectos atmosféricos y la transformación de números digitales en valores de reflectancia se realizaron en el software ENVI 5.0. Las espacializaciones de los datos de transparencia y de los valores de reflectancia se realizaron mediante interpolación en el *software* Spring 4.3.3. Los datos de reflectancia en el contexto espacio-temporal indican que las principales alteraciones corresponden a los sectores de los afluentes del embalse Passo Real. Los datos espectrales de la Banda 3 del sensor TM fueran relacionados con la variable de transparencia del agua en los 31 puntos de muestreo. Los



modelos generados por regresión lineal muestran que la transparencia del agua está correlacionada significativamente con los datos de reflectancia en la región espectral del rojo.

**Palabras clave:** Transparencia del agua, reflectancia espectral, embalse.

## INTRODUÇÃO

A produção de energia é um dos principais usos da água no Brasil e abastece cerca de 85% da energia necessária ao país. Os reservatórios hidrelétricos, além da geração de energia, apresentam outros benefícios socioeconômicos como a estocagem de água para usos futuros, controle de inundação, atividades recreativas, pesca e abastecimento de água. Porém, devido aos sucessivos represamentos e influências da ação humana são provocados ou potencializados diversos impactos ambientais (TUNDISI, 2005).

A utilização de produtos de sensoriamento remoto para auxiliar no monitoramento da qualidade de águas continentais desponta como instrumento de grande interesse da sociedade. O monitoramento e controle da qualidade de um recurso natural de vital é de suma importância para as condições de saúde pública, principalmente no caso de lagos naturais e reservatórios hidrelétricos que apresentam maior tempo de residência das águas (NOVO, 2005).

Um dos principais interesses no uso de produtos de sensoriamento remoto em ambientes aquáticos é verificar a variação espacial e temporal da composição da água, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água. Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes, matéria orgânica dissolvida e as moléculas de água em si, são os principais agentes que regem as propriedades ópticas inerentes da água e, portanto, são chamados de Constituintes Ópticamente Ativos (COAs) (RUDORFF et al., 2007; JENSEN, 2009). A transparência da água constitui-se em uma variável óptica aparente, influenciada pela própria água e pelos constituintes opticamente ativos nela suspensos e dissolvidos, pode ser usada como indicadora da presença desses materiais na água.

Tradicionalmente, o monitoramento da qualidade da água é realizado a partir da amostragem *in situ*. No entanto, o custo financeiro e operacional é alto, além da difícil amostragem em diferentes setores do corpo hídrico. Como possível solução para este problema, pode ser utilizada a base histórica de imagens Landsat 5 TM que permite a realização de estudos espaço-temporais de corpos d'água (WANG et al., 2004; WACHHOLZ, 2012).



As técnicas de sensoriamento remoto fundamentam-se no processo de interação entre a radiação eletromagnética e os diferentes alvos dos quais se pretende extrair algumas informações. Em estudos de recursos naturais da superfície terrestre, o fenômeno de reflexão é amplamente explorado, uma vez que as intensidades de radiação refletida pela superfície podem ser registradas (por sensores terrestres, aéreos ou orbitais) e desses registros, as informações podem ser extraídas e disponibilizadas no atendimento de diferentes aplicações (PONZONI; ZULLO JUNIOR; LAMPARELLI, 2007). O uso destas técnicas para monitoramento de reservatórios torna-se importante para sua compreensão em função de suas características que afetam a qualidade da água.

Dentre as imagens de sensoriamento remoto utilizadas para fins ambientais destacam-se as do sensor TM (WANG et al., 2004; HELLWEGGER et al., 2004; MCCULLOUGH, 2012). O sensor TM é um dos sensores a bordo do satélite Landsat. O potencial de utilização de imagens de diversos sensores é explorado para monitoramento de ambientes aquáticos e diversas pesquisas utilizam seus produtos para avaliar a transparência da água (BUTT; NAZZER, 2015; BONANSEA et al., 2019; FENG; HOU; ZHENG, 2019; VUNDO et al., 2019).

Inserida neste contexto, a presente pesquisa teve por objetivo verificar a relação entre dados de transparência da água identificados em campo e os valores de reflectância espectral do reservatório Passo Real obtidos por imagem Landsat 5 TM.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

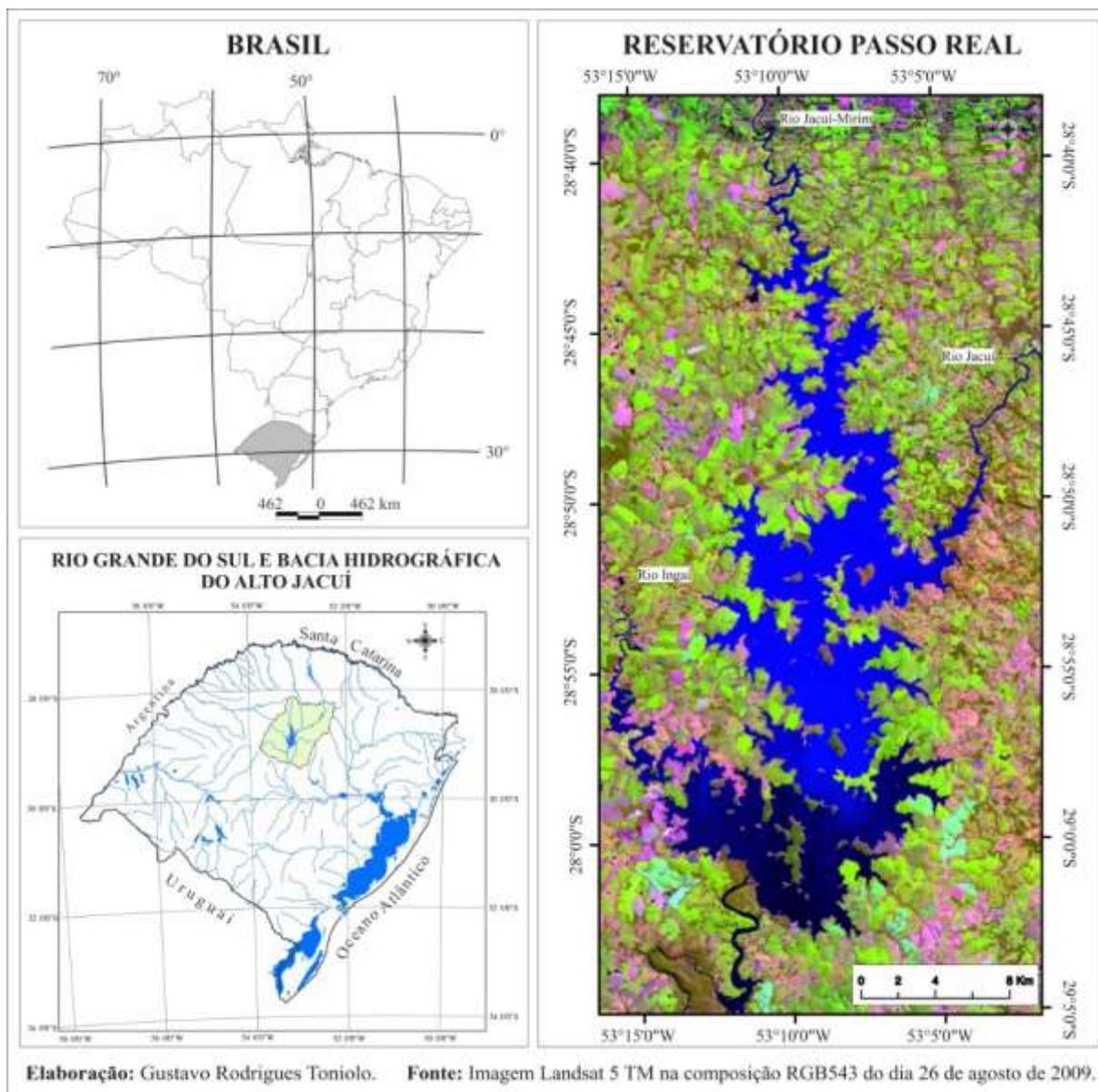
### *Características gerais da área de estudo*

No Rio Grande do Sul foram construídas cinco usinas hidrelétricas no alto curso do rio Jacuí com intuito de aproveitar seu potencial hidráulico. A Usina Hidrelétrica (UHE) Ernestina foi a primeira a ser concluída (1954). Para atender a demanda energética ainda foram construídas a UHE Jacuí (1963), Passo Real (1973), Itaúba (1978) e Dona Francisca (2000). O maior reservatório do Sistema Jacuí é o da Usina Hidrelétrica Passo Real (Figura 1) com 233,4 Km<sup>2</sup> (COAJU, 2010).

A Usina Hidrelétrica Passo Real possui potência instalada de 158.000 kW distribuídos em 2 geradores de 79.000 kW e localiza-se no município de Salto do Jacuí, RS. Com perímetro de 578 Km, o reservatório atinge áreas territoriais na sua margem direita dos Municípios de Selbach, Ibirubá, Quinze de Novembro, Fortaleza dos Valos e Salto do Jacuí e

margem esquerda: Alto Alegre, Campos Borges, Jacuizinho e Salto do Jacuí. A barragem é do tipo gravidade/enrocamento com núcleo de argila com extensão 3.800m (COAJU, 2009).

Figura 1 - Localização do reservatório Passo Real.



Fonte: TONIOLO et al. (2012).

No reservatório Passo Real a área correspondente à faixa de 100 metros de seu entorno apresenta-se ocupada de maneira intensiva por atividades agropecuárias. Ocorre também a



presença de ocupação residencial predominantemente com fins de lazer. A região que compreende a área do reservatório tem sua economia baseada no setor primário, especificamente na produção do trinômio trigo-milho-soja. As culturas desse trinômio agrícola ganham destaque no entorno do reservatório Passo Real que, graças ao potencial agrícola dos solos, são intensamente desenvolvidas. A aveia, em muitas áreas, também é cultivada, mas seu destino é basicamente para alimentação animal, assim como o milho. Praticadas em menor escala, mas apontadas como atividades em crescimento, ocorrem a fruticultura, principalmente de caqui, pêssago, pera, tangerina, além da produção de fumo e de tomate (CEEE-GT, 2009).

O Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul, em seu relatório “Análise das características da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí, utilizando imagens do satélite CBERS”, afirma que as margens do reservatório da UHE Passo Real apresentam poucos remanescentes de mata ciliar pelo uso intensivo do solo com agricultura e pastagem, próximo aos corpos hídricos. O relatório ainda sugere como uma das prioridades de ação, avaliar a qualidade da água do reservatório (MPRS, 2008).

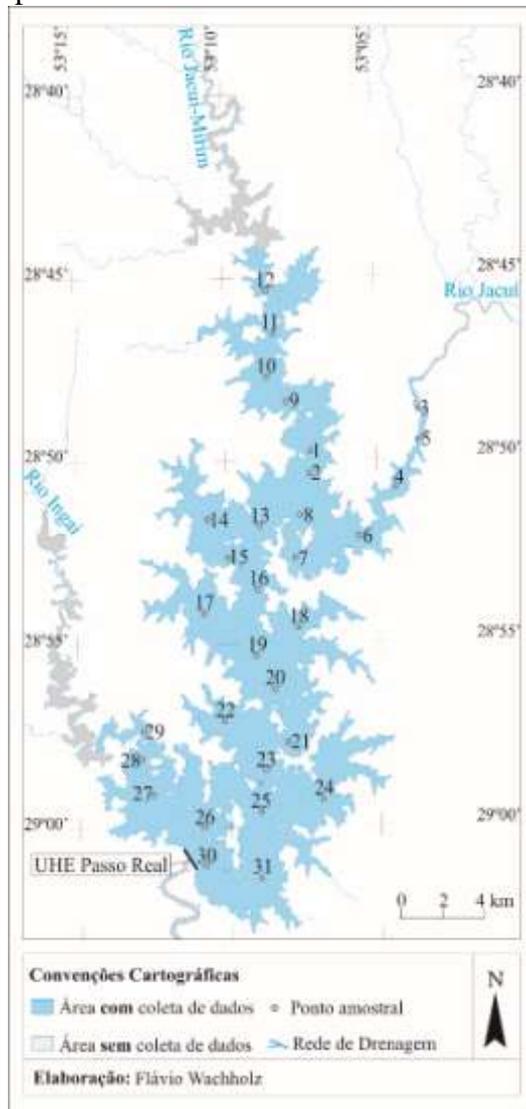
#### *Coleta e análise de dados*

Para a realização da presente pesquisa no reservatório Passo Real foram utilizadas metodologias distribuídas em duas fases: obtenção de dados em campo e em laboratório de processamento de imagens. Salienta-se que a presente pesquisa está relacionada a um projeto financiado pelo CNPq nº 484712/2007-1 (Caracterização Espectral e Limnológica de Ambientes Lênticos no Rio Grande do Sul, com Abordagem Espaço-Temporal).

Para a realização dos trabalhos de campo Pereira Filho et al. (2010) estabeleceram 31 pontos amostrais equidistantes que contemplam as diferenças espectrais encontradas no reservatório (Figura 2).

A transparência da água foi obtida com o uso de um disco de Secchi. A obtenção dos dados desta variável ocorre com submersão de um disco branco com 25 cm de diâmetro suspenso horizontalmente por uma corda graduada. A medida da transparência corresponde ao desaparecimento do disco quando mergulhado na água. As medições foram somente com céu claro (BARTRAM; BALANCE, 1996; WETZEL, 2000).

Figura 2 - Localização dos pontos amostrais no Reservatório Passo Real.



Fonte: Adaptado de Wachholz (2011).

As imagens de satélite utilizadas para a análise temporal da refletância da água foram produzidas pelo satélite Landsat 5, sensor TM, a partir das quais foi possível a extração de pixels puros em função da resolução espacial de 30 metros. A seleção de imagens foi a partir da disponibilidade de cenas sem presença de nuvens em datas mais próximas à realização dos trabalhos de campo, conforme apresentado no Quadro 1.

As imagens do satélite Landsat 5 TM foram adquiridas gratuitamente no catálogo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR>). A área referente ao reservatório Passo Real está compreendida na órbita/ponto 222/80.



Quadro 1 - Datas dos trabalhos de campo no reservatório Passo Real e das imagens de satélite Landsat 5 TM.

Data de coleta de dados de transparência <i>in situ</i>	Data da imagem selecionada (reflectância)	Defasagem entre data dos dados de transparência e reflectância (em dias)
13 e 14.03.2009	19.03.2009	+5
17 e 18.04.2009	20.04.2009	+2
04.06.2009	22.05.2009	-13
13.07.2009	25.07.2009	-12
13.08.2009	26.08.2009	+13
21.10.2009	29.10.2009	+8

O processamento das imagens foi realizado no software ENVI 5.0. A banda 3 (626-693 nm) correspondente à região do vermelho no espectro eletromagnético foi corrigida dos efeitos da atmosfera pelo método da Subtração do Pixel Escuro (*Dark-Object Subtraction*) proposto por Chavez Junior (1988). Os valores em números digitais da imagem foram transformados em valores de radiância espectral e após convertidos em reflectância de superfície conforme métodos descritos em Markham e Barker (1986).

Dados pontuais de reflectância foram consultados nas imagens a partir das coordenadas geográficas dos 31 pontos de coleta do reservatório. Com os dados limnológicos e espectrais organizados em tabelas no aplicativo Excel foi realizado testes estatísticos de regressão para interpretar e comparar os dados estudados.

As imagens convertidas em valores de reflectância foram importadas no *software* SPRING e realizada a espacialização destes dados por fatiamento em 21 classes. Para a espacialização da transparência da água, os dados foram inseridos no banco de dados geográfico do *software* SPRING, na forma de modelo numérico do terreno (MNT). Para cada data foi gerada uma grade retangular (interpolador por média ponderada), que posteriormente foi utilizada no fatiamento em 20 classes temáticas definidas e ponderadas de acordo com os estados tróficos definido por Carlson (1977) e modificados por Lamparelli (2004).

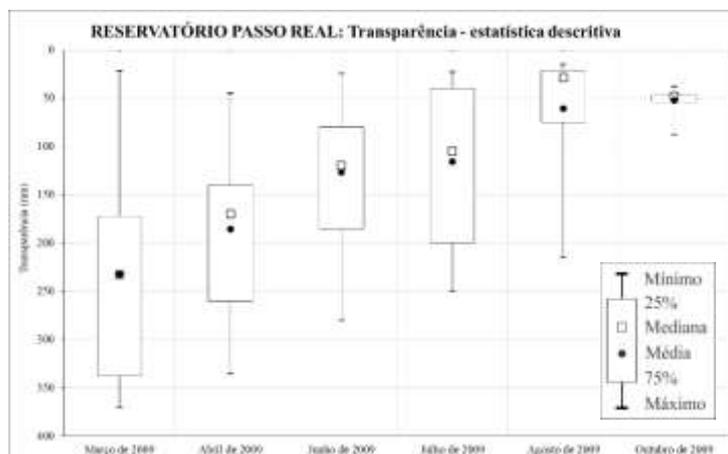
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variável limnológica estudada nesta pesquisa foi a transparência da água e é apresentada em conjunto com a reflectância da água. Estes dados são avaliados

estatisticamente com o intuito de verificar a relação entre as medidas de transparência obtidas em campo e a reflectância obtida por imagens de satélite.

Na análise temporal de Março de 2009 a Julho de 2009 as medidas de transparências do reservatório Passo Real em sua maioria foram superiores a 100 centímetros. Os períodos de Agosto de 2009 e Outubro de 2009 apresentaram transparências inferiores a 100 centímetros e com menor variância dos dados (Figura 3).

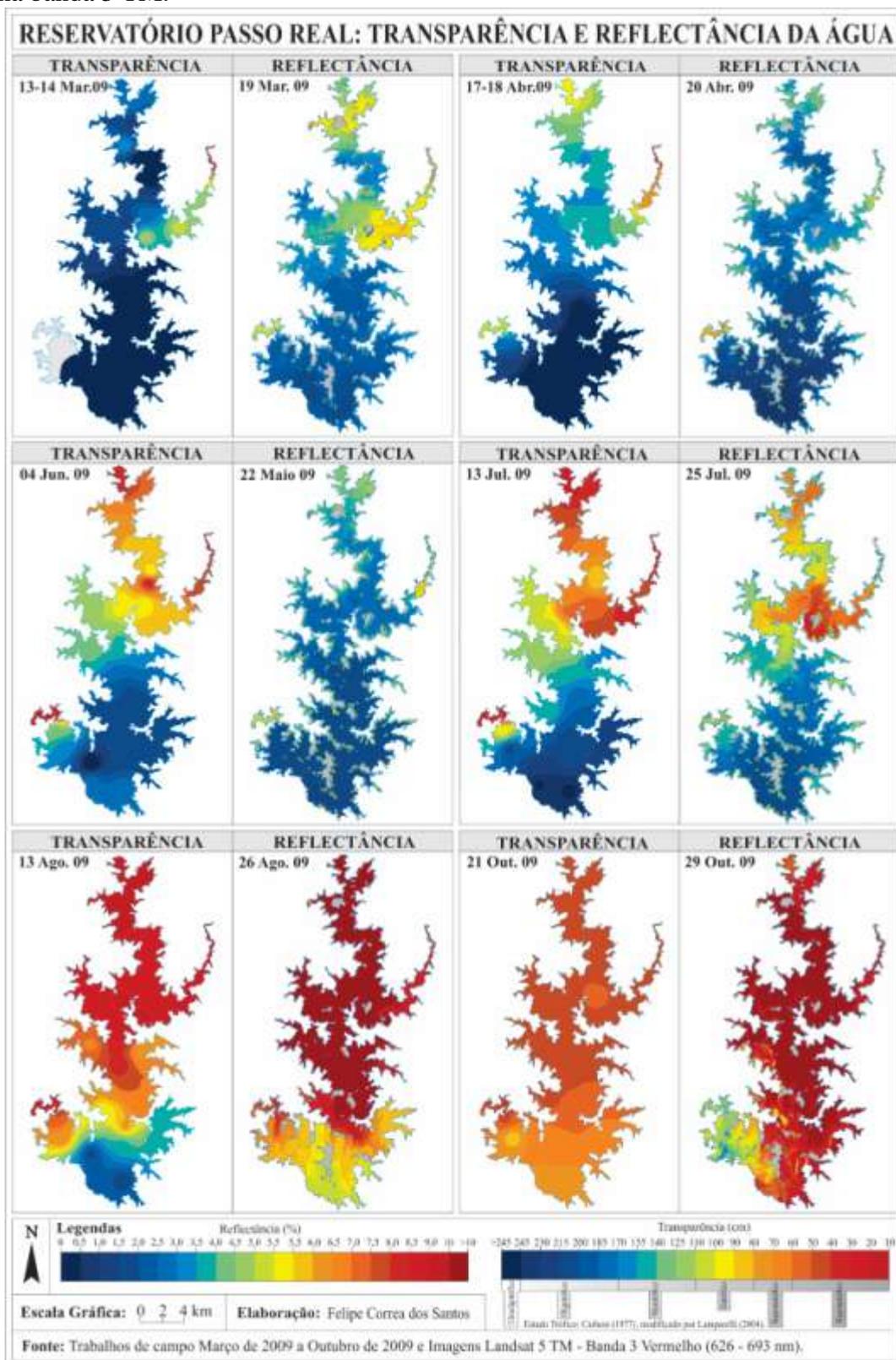
Figura 3 - Estatística dos dados mensais de transparência da água do reservatório Passo Real.



O contexto espacial demonstra a grande participação dos tributários na transparência do reservatório Passo Real (Figura 4). A espacialização dos dados para período de Março de 2009 apresentou setores transparentes caracterizando um estado ultraoligotrófico em quase totalidade do reservatório. Os setores com redução de transparência correspondem à entrada dos rios Jacuí e Jacuí-Mirim e apresentaram maior reflectância para o mesmo período. Salienta-se que a diferença de datas das imagens em relação ao campo é um período menor do que uma semana.

Semelhante a Março de 2009, os dados de Abril de 2009 demonstram a participação dos tributários na transparência do reservatório Passo Real. Este período caracterizou-se por águas transparentes em quase todo o reservatório, com redução da transparência e elevação da reflectância apenas nos setores de entrada dos rios.

Figura 4 - Espacialização da transparência e da reflectância da água do reservatório Passo Real na banda 3 TM.





Em Junho de 2009 as maiores transparências correspondem ao eixo central do reservatório, correspondentes aos pontos amostrais 20 a 31 e verifica-se a diminuição na transparência nos setores do reservatório que recebem águas dos rios Jacuí e Jacuí-Mirim. Essa condição avança para áreas mais centrais do reservatório. A imagem de Maio de 2009 apresentou dados de reflectância mais elevada na entrada das águas dos rios Jacuí e Jacuí-Mirim. Esta imagem corresponde a 13 dias anteriores a realização do campo em que foram observados os dados de transparência em Junho de 2009 e podem representar a entrada de sedimentos pelos rios no reservatório. Os dados de transparência medidos em campo apresentam o material já deslocado para o interior do reservatório.

As medidas de transparência da água em Julho de 2009 foram semelhantes às de Junho de 2009. Verifica-se transparência menor que 100 centímetros nos setores do reservatório que recebem águas dos rios Jacuí e Jacuí-Mirim e as transparências superiores a 150 centímetros correspondem ao eixo central do reservatório até o setor próximo ao dique.

Os dados de transparência foram inferiores a 100 centímetros em Agosto de 2009, com exceção do setor próximo ao dique, onde se encontra maior volume de água. Em uma análise temporal ocorreu redução da transparência em quase todo o reservatório se comparado com períodos anteriores.

Segundo Wachholz (2011) em Agosto de 2009, a redução do nível da água e o aumento das chuvas proporcionaram a diminuição da transparência. Esse período pode ser caracterizado como um grande pulso de material no reservatório. Os dados de reflectância se apresentaram elevados em quase todo o reservatório. A reflectância obtida por imagem (13 dias posterior ao campo) registrou avanço de sedimentos em suspensão oriundos do rio Ingaí para o interior do reservatório, setor em que foram registradas inicialmente transparências superiores a 150 centímetros.

Em Outubro de 2009 as transparências foram inferiores a 100 centímetros em todos os setores do reservatório e pouca variância dos dados. Este fato está relacionado ao volume de chuvas e ao baixo tempo de retenção das águas no reservatório. O acúmulo pluviométrico dos 30 dias anteriores à coleta foi de 212 mm, configurando um mês chuvoso principalmente por ser um ano influenciado pelo *El Niño*.

Em estudo anterior realizado por Santos (2012) foi constatado que em Outubro de 2009 as baixas medidas de transparência da água foram decorrentes de valores elevados de



clorofila a e presença de sólidos em suspensão na água. Este efeito foi consequência das elevadas precipitações que proporcionaram o transporte de material para o corpo hídrico, pois no período de entressafra e início do plantio das culturas de verão os solos encontram-se menos protegidos. Neste período o reservatório apresentou altos valores e pouca variância nos dados de reflectância. O setor de entrada das águas do rio Ingaí e próximo ao dique apresentam valores de reflectância inferiores ao restante do reservatório.

Os gráficos de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real são apresentados na Figura 5.

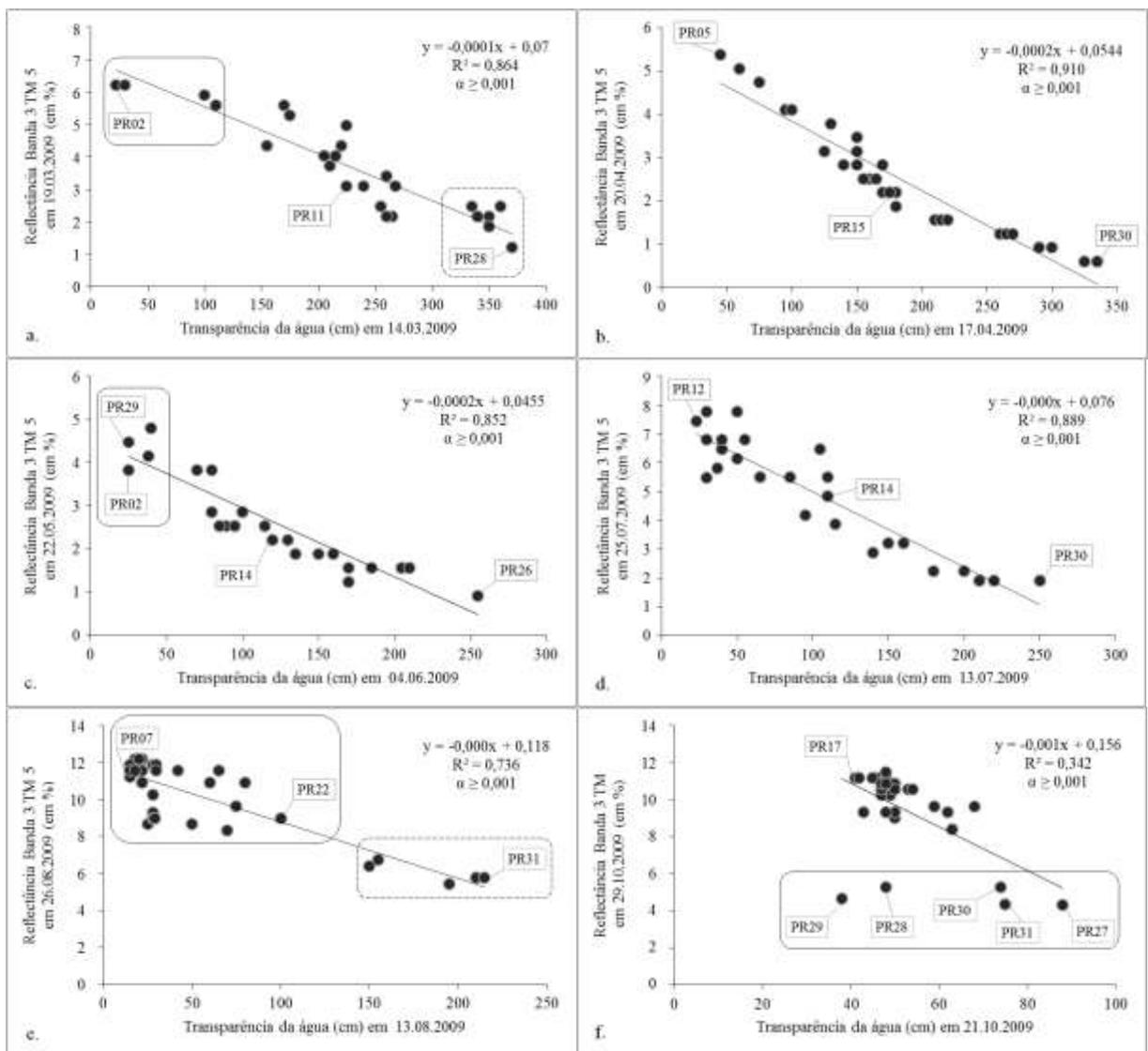
O modelo de regressão gerado para os dados de Março de 2009 apresentam três agrupamentos de pontos amostrais que representam a configuração do ambiente aquático neste período. O grupo circulado em linha contínua representa os dados referentes ao compartimento aquático de entrada do rio Jacuí no reservatório e caracterizaram-se por transparência abaixo de 120 centímetros e maiores valores de reflectância para este período. Os pontos amostrais de entrada do rio Ingaí apresentam características opostas e estão circulos em linha tracejada por se constituírem em ambientes de transparências superiores a 320 centímetros e menores valores de reflectância. Os valores intermediários de transparência e reflectância da água são encontrados no setor de entrada do rio Jacuí-Mirim (PR11) e em setores no interior do reservatório.

O período de Abril de 2009 foi o que apresentou melhor ajuste linear com forte coeficiente de determinação ( $R^2=0,91$ ). Este fato pode estar associado a pequena diferença de tempo entre a coleta de dados em campo e a passagem do satélite (2 dias). O ponto amostral PR05 foi o que apresentou menor transparência (45 centímetros) e maior reflectância neste período e demonstra a situação do setor de entrada do rio Jacuí no reservatório. Em situação oposta encontra-se o ponto PR30 com transparência de 335 centímetros e baixo valor de reflectância. O ponto amostral PR15, localizado no setor central do reservatório, representa a mediana dos dados de transparência que na regressão configura-se entre os dados intermediários na dispersão.

Em Junho de 2009 embora com diferenças de aproximadamente duas semanas entre as coletas de dados em campo e passagens do satélite na área de estudo, os dados se configuraram em tendência linear nos modelos apresentados. Em Junho de 2009 destaca-se o grupo de pontos amostrais (circulos no gráfico) com medidas de transparência abaixo de 50

centímetros e os maiores valores de reflectância neste período por estarem situados nos setores de entrada dos rios Ingaí, Jacuí, Jacuí-Mirim e no setor de mistura dos últimos dois rios referidos.

Figura 5 – Gráficos de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real.



Os dados de Julho de 2009 configuraram-se em tendência linear no modelo apresentado com forte correlação entre transparência e reflectância, além de demonstrar a grande influência da entrada de água dos rios no reservatório nos dados analisados. Destaca-



se a diferença de 12 dias entre a coleta de dados em campo e passagens do satélite na área de estudo.

Os dados de Agosto de 2009 apresentaram forte correlação entre transparência e reflectância, embora seja menor que os períodos anteriores estudados. A dispersão dos dados remete a uma divisão em dois grupos. Um grande grupo com transparências até 100 cm (circulado no gráfico em linha contínua) apresentou altos valores de reflectância e correspondem aos setores desde as entradas dos rios Jacuí e Jacuí-Mirím até o setor central do reservatório (PR22). O segundo agrupamento de dados corresponde ao setor próximo ao dique do reservatório e o de entrada do rio Ingaí (circulado no gráfico em linha tracejada), em que foram medidas transparências superiores a 150 centímetros e valores de reflectância menores que o primeiro grupo mencionado. Apesar destes pontos amostrais apresentarem valores de reflectância menores que o do primeiro grupo, ainda são valores mais altos do que o esperado para este setor. Esta ocorrência é devido ao deslocamento do material em suspensão do setor de entrada do rio Ingaí ao compartimento próximo ao dique, pois esta dinâmica das águas do reservatório ocorreu no período de 13 dias entre a coleta em campo e a passagem do satélite.

Ao observar a regressão para os dados de Outubro de 2009 nota-se a ocorrência de pontos amostrais afastados da linha de tendência (circulados no gráfico). Os pontos com medidas de transparências próximas a 40 cm apresentaram valores de reflectância abaixo do esperado de acordo com o modelo de regressão. Estudos realizados por Pereira Filho et al. (2011), Wachholz (2011) e Santos (2012) relatam uma floração de algas no setor próximo a entrada do rio Ingaí com concentração de clorofila *a* que chegam a 439,52 µg/L (PR29). A banda 3 do sensor TM sendo sensível a absorções de pigmentos fotossintéticos apresentou valores baixos de reflectância neste setor do reservatório.

A transparência da água relacionada com dados espectrais de imagens Landsat são avaliadas em outros estudos. Hellweger et al. (2004) relata em sua pesquisa que a reflectância na faixa do vermelho foi a que melhor correlacionou com dados de transparência obtidos com disco de Secchi. Em trabalho realizado por Wu et al. (2008) a faixa do vermelho em dados Landsat 5 TM apresentou correlações negativas com dados de transparência. As imagens Landsat foram importantes para compreensão do funcionamento espaço-temporal de reservatórios estudados realizados por Wachholz e Cabral (2012) com destaque para análise de variação da reflectância na banda TM3 (vermelho) relacionada à transparência da água.



Procedimentos semelhantes foram aplicados por McCullough (2012) para monitoramento remoto da transparência da água com imagens TM de lagos em Maine, localizada no nordeste dos Estados Unidos. Os modelos de regressão linear multivariada das medidas de disco de Secchi de 1.511 lagos de Maine (no período de 1990-2010) e dos dados de transparência estimados por satélite indicaram que as bandas 1 e 3 do satélite Landsat 5 TM possuem grande potencial de monitoramento da transparência de ambientes aquáticos.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transparência da água medida em campo com o uso de Disco de Secchi foi comparada com os valores de reflectância na faixa do vermelho (TM3) de imagens Landsat 5 em 31 estações amostrais do reservatório Passo Real. A reflectância é mais elevada em estações de coletas que apresentaram baixa transparência da água. Os setores que mais sofreram diminuição de transparência correspondem às entradas de rios no reservatório. Foram encontradas fortes correlações entre os dados e padrões no que se refere aos diferentes setores do reservatório e conclui-se que os modelos de regressão podem ser usados para estimar a transparência da água, porém devem ser usados com cautela, visto que sob certas situações a relação entre estas variáveis diminui, especialmente quando há elevada concentração de clorofila *a*.

A transparência da água é uma variável altamente dinâmica e ao se correlacionar dados obtidos *in situ* com os de imagem e satélite deve ser observada a defasagem entre as datas de coletas. O grau de correlação entre os dados esteve dependente do período de defasagem entre campo e imagem. Apesar da defasagem entre os dados desta pesquisa ter sido de até 13 dias mesmo assim apresentaram correlações significativas.

A presença de pigmentos fotossintetizantes na água diminuiu o grau de correlação de dados de transparência e reflectância na faixa do vermelho. Em condições de alta concentração de clorofila *a*, tanto a transparência medida em campo quanto a reflectância registraram baixos valores para o período (inferiores a 90 centímetros e 6% respectivamente). Foi constatada a presença de floração de algas no compartimento do rio Ingaí no mesmo período, de acordo com registro apresentado em trabalhos de Pereira Filho et al. (2011), Wachholz (2011) e Santos (2012). A banda 3 do sensor TM é sensível à absorção de energia



eletromagnética por pigmentos fotossintetizantes, o que resulta em valores baixos de reflectância em setores com presença de florações de algas.

As imagens de satélite caracterizaram-se em importantes ferramentas para compreensão do funcionamento espaço-temporal do reservatório. Embora pesquisadores devam estar cientes que frequentemente a cobertura de nuvens reduz a disponibilidade de imagens Landsat reduzindo a possibilidade de monitoramento constante de um ambiente aquático.

## REFERÊNCIAS

- BARTRAM, J; BALANCE, R. (Editores). **Water Quality Monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes.** London: E & FN SPON, 1996.
- BONANSEA, M.; LEDESMA, M; RODRIGUES, C; PINOTTI, L. Using new remote sensing satellites for assessing water quality. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 1, p. 34-44, 2019.
- BUTT, M. J.; NAZEER, M. Landsat ETM+ Secchi Disc Transparency (SDT) retrievals for Rawal Lake, Pakistan. **Journal Advances in Space Research**, v. 56, n. 7, p. 1428-1440, 2015.
- CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnology Oceanography**, v. 22, p. 361-380, 1977.
- CEEE–GT (Companhia Estadual de Geração de Energia Elétrica – Geração e Transmissão). **Plano de uso e ocupação do solo no entorno do Reservatório da UHE Passo Real.** Porto Alegre: PROFFIL, 2009.
- CHAVEZ JUNIOR, P. S.; An Improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1988.
- COAJU – Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí. **Plano de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí:** consolidação das informações existentes sobre os recursos hídricos da bacia. Relatório Temático – RT 2, 2009, Passo Fundo, 2009.
- COAJU – Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí. **História do Sistema Jacuí.** Disponível em: <[www.upf.br/coaju/download/Historia\\_Sistema\\_Jacui\\_1.ppt](http://www.upf.br/coaju/download/Historia_Sistema_Jacui_1.ppt)> Acesso em: 11 de outubro de 2010.



HELLWEGER, F. L. SCHLOSSERA. P.; LALLA U, WEISSEL, J.K. Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.61, p.437-448, 2004.

FENG, L.; HOU, X.; ZHENG, Y. Monitoring and understanding the water transparency changes of fifty large lakes on the Yangtze Plain based on long-term MODIS observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 221, p. 675-686, 2019.

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

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 238f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências, São Paulo, 2004.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L.; Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperature. **EOSAT Landsat Technical Notes**, Nº 1, August, 8p., 1986.

MCCULLOUGH, IAN M. **Remote Estimation of Regional Lake Clarity with Landsat TM and MODIS Satellite Imagery**. 90f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Ciências Ambientais) - The University of Maine, Orono, 2012.

MPRS - MINISTÉRIO PÚBLICO DO RIO GRANDE DO SUL. **Análise das características da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí, utilizando imagens do satélite CBERS**. (Parecer da Divisão de Assessoramento Técnico nº 2757/2008). Porto Alegre, 2008.

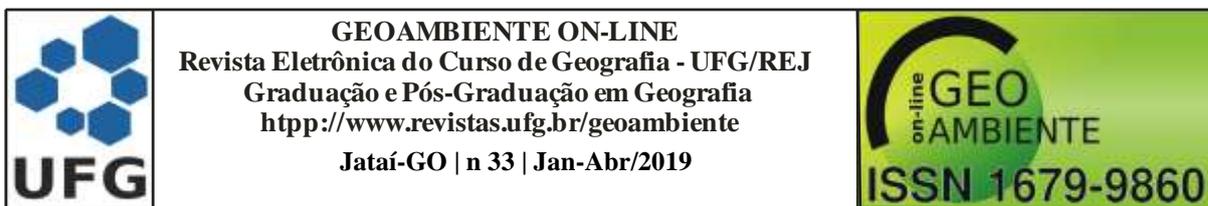
NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto Aplicado à Ecologia Aquática. In: ROLAND, F.; CESAR, D.; MARINHO, M. (Orgs.) **Lições de Limnologia**. São Carlos: RIMA, 2005. p 418- 432.

PEREIRA FILHO, W.; et al. **Caracterização espectral e limnológica de ambientes lenticos e lóticos no Rio Grande do Sul, com abordagem espaço-temporal**. Relatório Técnico apresentado ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo nº 484712/2007-1, 2010.

PEREIRA FILHO, W; BARBIERE, D.W; WACHHOLZ, F; CORAZZA, R; TRENTIN, A,B; TRINDADE, P,M; DOMINGUES, A,L; Relação entre clorofila a com perfil espectral e imagem de satélite no reservatório Passo Real – RS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011. Curitiba. **Anais...** Curitiba: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011. p.5433-5440.



- PONZONI, F. J.; ZULLO JUNIOR, J.; LAMPARELLI, R. A. **Calibração absoluta de sensores orbitais**: conceituação, principais procedimentos e aplicação. São José dos Campos: Parêntese, 2007.
- RUDORFF, C. M.; NOVO, E, M,L,M ; GALVÃO, L, S ; PEREIRA FILHO, W. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, 2007. p. 269-280.
- SANTOS, F. C. **Influência dos constituintes opticamente ativos na reflectância espectral da água do reservatório Passo Real, RS**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
- TONIOLO, G. R. et al. **Análise temporal da relação entre a reflectância da água e o uso e cobertura da terra no reservatório Passo Real no Alto Jacuí – RS**. Relatório Técnico apresentado ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo GAP/UFSM nº 032117 como comprovante das atividades referentes ao projeto PIBIC/CNPq/UFSM, 2012.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI**: enfrentando a escassez. 2.ed. São Carlos: Rima, 2005.
- VUNDO, A.; MATSUSHITA, B; JIANG, D; GONDEW, M; HAMZAH, R; SETIAWAN, F; FUKUSHIMA, T. An Overall Evaluation of Water Transparency in Lake Malawi from MERIS Data. **Remote Sensing**, v. 11, n.279, 2019.
- WACHHOLZ, F. **Influência das bacias hidrográficas e características espaço-temporal de variáveis limnológicas em reservatórios no Rio Grande do Sul**. 2011. 191 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.
- WACHHOLZ, F. Alterações espectrais nas imagens de satélite nos reservatórios das usinas hidrelétricas Caçu e Barra dos Coqueiros - GO. **Revista GeoNorte**, v. 2, p. 1170-1179, 2012.
- WACHHOLZ, F.; CABRAL, J.B.P. Impacto das Usinas Hidrelétricas a modo de fio d'água no rio Claro na transparência da água, com o uso de dados espectrais de imagens Landsat TM5. In: Symposium SELPER, 15, 2012, Caiena. **Anais... Caiena: PROCEEDINGS SELPER**, 2012. p. 1-8.
- WANG Y; XIA, H, FU, J; SHENG, G. Water quality change in reservoirs of Shenzhen, China: detection using LANDSAT/TM data. **Science of The Total Environment**, v. 328, n. 1–3, p. 195-206, 2004.
- WETZEL, R. G. **Limnological analyses**. 3rd. ed. New York, NY: Springer, 2000.



WU, G; et al. Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo-spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve, China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n.8, 2183–2198, 2008.