

UMA APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL NO MONITORAMENTO DE ÁREAS INFESTADAS POR PLANTAS AQUÁTICAS

Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo¹
Edivaldo Domingues Velini²
Maria Lúcia Bueno Trindade³
Daniel Luis de Lima⁴

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT – Departamento de Cartografia – Campus de Presidente Prudente – mlourdes@prudente.unesp.br

²Universidade Estadual Paulista – UNESP – Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA – Departamento de Agricultura – Campus de Botucatu – velini@fca.unesp.br

³Criativa – Consultoria em Matologia e Meio Ambiente S/C Ltda

⁴Universidade Estadual Paulista – UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – Campus de Presidente Prudente – daniel@pos.prudente.unesp.br

RESUMO

A elevada infestação por plantas aquáticas em reservatórios de hidrelétricas tem se tornado um problema de importância crescente no Brasil. Considerando que as características espectrais da água são modificadas na presença de vegetação aquática, o sensoriamento remoto pode se constituir em uma ferramenta importante para a espacialização e monitoramento desse tipo de ocorrência. Nesse contexto, com o objetivo de mapear a distribuição espacial e caracterizar a evolução de áreas infestadas por plantas aquáticas em uma área de estudo localizada próxima à confluência dos rios Tietê e Paraná, foram utilizados dados multitemporais TM e ETM+/Landsat, e técnicas de processamento e análise de imagens multiespectrais. Verificada a possibilidade de detectar plantas aquáticas imersas em imagens tomadas nos comprimentos de onda do visível, submetidas a um contraste logarítmico, foi especificada uma abordagem metodológica para o processamento e análise das imagens multiespectrais, de modo a viabilizar a representação da distribuição espacial e a estimativa da área infestada por plantas aquáticas submersas, flutuantes e marginais. Os resultados obtidos viabilizaram a realização de algumas inferências sobre as condições de ocorrência dessas plantas aquáticas na área de estudos e forneceram subsídios para a elaboração de uma proposta de manejo deste tipo de vegetação aquática.

Palavras-chave: Resposta Espectral da Água, Monitoramento de Plantas Aquáticas, Sensoriamento Remoto Orbital.

AN APPLICATION OF THE ORBITAL REMOTE SENSING IN THE AQUATIC PLANTS INFESTATION MONITORING

ABSTRACT

The excessive colonization and growth of the aquatic plants in reservoirs cause serious impacts on multiple use of the water bodies. The knowledge about spatial distribution and evolution of the plants infestation is fundamental to subside its management. So, remote sensing can be used as a complementary data source to monitoring of aquatic plants in large reservoirs, since that water spectral response is modified by aquatic vegetation occurrence. In this context, TM and ETM+/Landsat multispectral and multitemporal data were used to mapping and monitoring the spatial dispersion of the aquatic plants in a study area located in Tietê river, SP, and investigated its potential to detect subaquatic plants in spectral bands of the visible wavelength. This paper presents the methodology adopted to map the spatial representation of the emerged and submerged aquatic plants and to estimate its infestation area. In addition, the obtained results were used to perform an evaluation of the infestation conditions in the study area and to subside a management purpose of these aquatic plants.

Keywords: Spectral Response of Water, Aquatic Plants Monitoring, Remote Sensing.

1. INTRODUÇÃO

Muito embora as plantas aquáticas tenham um papel fundamental no equilíbrio dos ambientes aquáticos abertos, além de sua importância crucial no fornecimento de alimento e refúgio para animais, seu crescimento indiscriminado pode obstruir canais, represas e reservatórios, reduzindo a disponibilidade de água para uso humano e acarretando um desequilíbrio no ambiente aquático. No Brasil, a ocorrência de plantas aquáticas em reservatórios de hidrelétricas tem sido um problema de importância crescente. Alguns reservatórios já têm sua eficiência comprometida pela elevada infestação de plantas aquáticas, decorrentes tanto do descarte de resíduos industriais e esgoto nos recursos hídricos, quanto da ação direta do homem sobre o meio.

Segundo Velini et al. (2001), diferente do que ocorre no Brasil, em outros países, com destaque para os EUA, a situação é completamente diferente. Em alguns casos, como no Estado da Flórida, o controle de plantas aquáticas é considerado uma questão de segurança pública, tendo sido criado um imposto (que incide sobre a comercialização de combustíveis) especificamente para financiar pesquisas (básicas e aplicadas) e ações visando o controle de plantas aquáticas. Os principais métodos de controle (biológico, mecânico e químico) estão plenamente desenvolvidos havendo legislações específicas que regulam seus usos.

Porém, a aplicação de medidas de controle pode ser mais efetiva com o mapeamento prévio e monitoramento da dispersão espacial das áreas infestadas. Nesse sentido, a tecnologia do sensoriamento remoto pode se constituir numa ferramenta valiosa e fornecer subsídios para o efetivo manejo dessas áreas, mesmo considerando a variedade de tipos de vegetação aquática que podem se constituir problemas (flutuantes ou enraizadas nos sedimentos do fundo; submersas ou emersas na superfície d'água).

O sensoriamento remoto da água se baseia no fato que as substâncias presentes na água afetam a sua cor, cujas mudanças são decorrentes de alterações na radiação da água. Desse modo, a investigação das características de um corpo d'água usando sensoriamento remoto, implica em primeiramente, entender como a água pura absorve ou reflete, seletivamente, a luz incidente ao longo da coluna d'água. Em seguida deve-se considerar como essa luz incidente é afetada quando a coluna d'água contém materiais orgânicos e inorgânicos (JENSEN, 2000).

Diferente do solo e da vegetação, a maior parte do fluxo radiante incidente sobre a água não é refletido, mas absorvido ou transmitido. Nos comprimentos de onda do visível, pouca luz é absorvida, uma pequena quantidade é refletida e a maior parte é transmitida. Moreira (2001) destaca que a água no estado líquido absorve a radiação eletromagnética abaixo de 380nm e acima de 700nm e que, mesmo nessa faixa intermediária, a reflectância da água é relativamente pequena, ultrapassando pouco mais de 5%. Especificamente para a água pura, a reflectância no espectro visível decresce de cerca de 5% no azul para menos de 1% no infravermelho próximo (NOVO et al., 1989). Desse modo, a forte absorção da radiação do infravermelho próximo e médio pela água resulta em um forte contraste entre a água e os limites de terra.

Segundo Robin (1995), a água pura tem uma resposta espectral característica: sua reflectância é elevada no intervalo espectral correspondente à luz azul, diminui no verde, fraca no vermelho e quase nula no infravermelho próximo. Na realidade, a água absorve inteiramente a radiação do infravermelho próximo incidente já nos primeiros centímetros da coluna d'água, na ausência de matéria orgânica ou sedimentos em suspensão. Por outro lado, a presença de constituintes orgânicos e inorgânicos na coluna d'água acarreta um aumento significativo na radiação refletida pelo corpo d'água nesse intervalo espectral do infravermelho próximo (JENSEN, 2000).

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto depende, então, da habilidade do sistema sensor medir variações na radiação refletida a partir da água e relacionar tais mudanças com seus constituintes ou parâmetros que indiquem sua qualidade. Naturalmente, os comprimentos de onda mais adequados para essas medições dependem das substâncias que estão sendo avaliadas e das características do sensor. Levando em conta que as características dos sensores remotos orbitais quanto à sua resolução espacial e espectral e os mecanismos de interação da radiação eletromagnética com a água definem uma variabilidade espectral bastante tênue para os corpos d'água, a maioria dos estudos sobre qualidade da água, utilizando o sensoriamento remoto, têm se limitado à detecção de particulados em suspensão e de vegetação aquática emersa.

Assim, se por um lado existe uma limitação técnica dos dados multiespectrais adquiridos sistematicamente a partir de plataformas orbitais para aplicações com água, a dimensão do espelho d'água de muitos reservatórios brasileiros pode inviabilizar programas de monitoramento dos corpos d'água, face ao alto custo da implementação de um esquema de levantamento "in situ". Devido ao seu caráter sinóptico e repetitivo, as imagens de satélite podem se constituir em um recurso auxiliar valioso no processo de mapear e monitorar a distribuição espacial de alguns componentes presentes no corpo d'água.

Considerando o exposto, este trabalho apresenta uma investigação desenvolvida com o objetivo de mapear e monitorar a distribuição espacial de áreas infestadas por plantas aquáticas emersas e imersas,

em uma área de estudo localizada próxima à confluência dos rios Tietê e Paraná, a partir da utilização de dados multiespectrais TM e ETM+/Landsat, além de imagens de alta resolução Ikonos. A realização da pesquisa permitiu avaliar a possibilidade de uso de dados multiespectrais, nos comprimentos de onda do visível, para a detecção de plantas aquáticas imersas, assim como especificar a abordagem metodológica adotada no processamento e análise das imagens de satélite multiespectrais, de modo a viabilizar a representação da distribuição espacial e estimativa da área infestada por plantas aquáticas.

2. RESPOSTA ESPECTRAL DA ÁGUA E VEGETAÇÃO AQUÁTICA

Ao interagir com a superfície terrestre, a radiação eletromagnética pode sofrer absorção, reflexão e transmissão, dependendo das propriedades desta superfície e do intervalo espectral considerado. Os comprimentos de onda nos quais a radiação é refletida e transmitida são utilizados na identificação dos alvos em sensoriamento remoto.

No contexto do sensoriamento remoto, a reflectância espectral, especificada para um dado intervalo de comprimento de onda e segundo uma determinada geometria de aquisição, define o comportamento espectral de um alvo, sendo esta definição amplamente utilizada em sensoriamento remoto, para a caracterização dos alvos. Conforme destaca Robin (1995), a água pura tem uma alta reflectância no intervalo espectral do azul, diminui no verde, é fraca no vermelho e quase nula no infravermelho próximo.

A característica mais perceptível da água pura é que a menor absorção e transmissão da luz incidente ocorre na região espectral entre 400 a 500nm (luz azul). Nos comprimentos de onda entre 520 e 580nm (luz verde), a absorção é alta, porém nessa região, a energia espalhada pelas moléculas de água é relativamente pequena. Similarmente, entre 580 a 740nm (luz vermelha) a quantidade de luz transmitida ao longo da coluna d'água torna-se insignificante, quando comparada com a absorção pelas moléculas de água. Nos intervalos espectrais do infravermelho próximo e médio (740 a 3000nm) quase toda radiação incidente é absorvida nos primeiros centímetros da coluna d'água (JENSEN, 2000).

Segundo Curran (1985), os fatores que afetam a variabilidade espectral na reflectância de um corpo d'água são, geralmente, determinados pelo ambiente. Os três fatores mais importantes são: profundidade do corpo d'água, presença de materiais em suspensão e a rugosidade da superfície do corpo d'água.

Novo et al. (1994) argumentam que os componentes da água absorvem seletivamente a luz que chega ao volume d'água, sendo essa absorção máxima em alguns comprimentos de onda. Os pigmentos fotossinteticamente ativos são responsáveis pela absorção nas regiões espectrais do azul e do vermelho, de modo que um aumento na quantidade de fitoplâncton na água produz uma redução na quantidade dessa energia e a cor da água é percebida como verde. A matéria orgânica dissolvida é também responsável por uma mudança no coeficiente de absorção da água, ocorrendo um máximo na região do azul e decrescendo com o comprimento de onda. Como consequência, a cor da água muda do azul (água limpa) e verde (água rica em fitoplâncton) para o amarelo, conforme o aumento da quantidade dos componentes orgânicos dissolvidos.

Algumas das observações anteriores são reafirmadas por Robin (1995) com base em resultados de simulações, realizadas com o intuito de analisar o efeito da concentração de clorofila, particulados e matéria orgânica dissolvida sobre a reflectância do mar. O autor relata que:

- um aumento na concentração de clorofila (fitoplâncton) se traduz por uma diminuição da reflectância no azul e no vermelho, um aumento no infravermelho próximo e manutenção da reflectância no verde;
- quando a água tem uma alta carga de turbidez mineral (partículas não-clorofiladas), sua reflectância aumenta e tende a se aproximar daquela do solo, em decorrência do aumento da reflexão no verde, vermelho e infravermelho próximo;
- quando a água carrega materiais orgânicos dissolvidos (aumento na concentração de substâncias amarelas), sua reflectância diminui como a de um solo rico em matéria orgânica.

Diante do exposto, e conforme esclarece Jensen (2000), a região espectral mais apropriada para discriminar água e terra, é o infravermelho (próximo e médio), uma vez que os corpos d'água refletem muito pouco nessa região, aparecendo muito escuros em imagens tomadas neste espectro. Por outro lado, quando existem constituintes orgânicos e inorgânicos na coluna d'água ocorre um aumento significativo na radiação refletida pelo corpo d'água nesse intervalo espectral.

No que se refere à mudança na resposta espectral em decorrência da presença de materiais inorgânicos na água, Novo et al. (1989) analisaram sedimentos com coloração e granulometria diferentes e concluíram que o tipo do particulado pode afetar o grau de correlação entre a concentração dos sedimentos em suspensão e a reflectância e que esse efeito é mais perceptível nos menores comprimentos de onda.

Tentativas de correlacionar a resposta espectral com a ocorrência de componentes que indiquem a qualidade da água em grandes reservatórios têm sido relatadas desde que as imagens orbitais MSS/Landsat tornaram-se disponíveis (RITCHIE et al., 1976; SCARPACE et al., 1979). Com a disponibilidade das imagens TM, foram realizados experimentos para verificar se o aumento na

resolução espacial dessas imagens permitiria estimativas da concentração dos componentes individuais da água. No entanto, conforme salienta Novo et al. (1994), a maior limitação desses dados é sua resolução espectral inadequada para estudos da água, a qual não permite discriminar componentes opticamente ativos, principalmente quando ocorrem simultaneamente altas concentrações de clorofila e material inorgânico.

Em artigo recente, Ritchie et al. (2000) reafirmam que, apesar da sensação atual de que as tecnologias de sensoriamento remoto tenham aplicações reais e potenciais para avaliar recursos aquáticos e monitorar a qualidade da água, limitações nas resoluções espacial e espectral dos atuais sistemas sensores orbitais, têm restringido a utilização de imagens de satélite em aplicações diretamente relacionadas com o monitoramento da qualidade da água. Nesse sentido, vale destacar que, com a disponibilidade de imagens orbitais adquiridas por sensores de alta resolução espacial, assim como a crescente utilização de câmaras multiespectrais instaladas em aeronaves, a questão da resolução espectral das imagens continua sendo a grande restrição ao seu uso, em uma série de aplicações para os ambientes aquáticos.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para o desenvolvimento da pesquisa refere-se a uma porção do rio Tietê, Estado de São Paulo, localizada próxima à sua confluência com o rio Paraná, conforme ilustra a Figura 1, elaborada a partir de uma composição colorida ETM+/Landsat, bandas espectrais 3, 4 e 5, associadas às cores azul, verde e vermelho, respectivamente. A seleção da área de estudos (definida pelas coordenadas UTM 438.000 a 472.000E e 7.705.000 a 7.720.000N) considerou, principalmente, a ocorrência de grandes áreas infestadas por plantas aquáticas emersas e imersas, mas também, a disponibilidade de imagens orbitais e dados levantados “in situ”, os quais foram cedidos pela coordenação do projeto “Formação de base de dados sobre quantidade, crescimento e distribuição de plantas aquáticas em reservatórios da CESP”, financiado pela CESP, Companhia Energética de São Paulo.

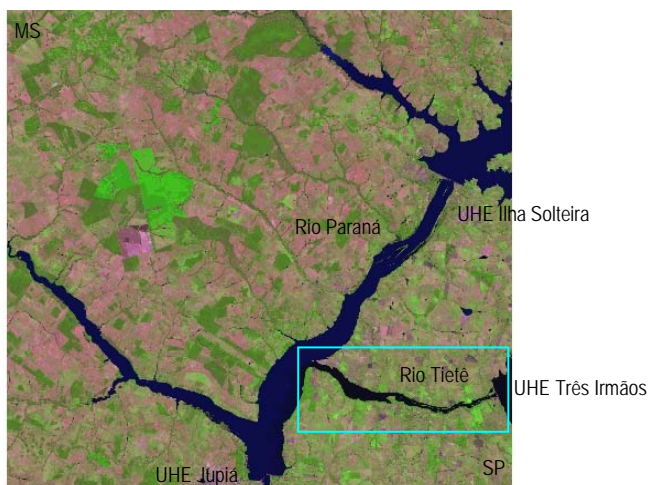


Figura 1 – Localização da área de estudos (demarcada em cian), em uma composição colorida ETM+/Landsat, bandas 3, 4 e 5, associadas às cores azul, verde e vermelho, respectivamente.

3.2. DADOS MULTIESPECTRAIS UTILIZADOS

A aquisição de dados de sensoriamento remoto, com aplicação em recursos naturais, pode ser feita através de sensores instalados em plataformas orbitais. Dentre os sistemas sensores utilizados para esse fim, podem ser destacados o TM - *Thematic Mapper* (instalado a bordo dos satélites Landsat 4 e 5); o ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) do satélite Landsat 7, cujas características técnicas são um aprimoramento do TM, sensores HRV - *Haute Resolution Visible*, os quais constituem a carga útil do satélite francês SPOT, entre outros. Em setembro de 1999, com o lançamento do satélite IKONOS II, a comunidade de sensoriamento remoto passou a dispor das imagens de alta resolução espacial geradas a partir dessa plataforma.

Operando a bordo do satélite Landsat 5, o *Thematic Mapper* - TM constitui-se de um sensor imageador óptico multiespectral que coleta dados da superfície terrestre, simultaneamente, em sete bandas espectrais. Seis dessas bandas operam na região refletida do espectro óptico e apresentam uma

resolução espacial de 30 metros no terreno. A outra banda espectral, designada como banda TM6, capta a radiação termal e tem uma resolução espacial de 120 metros. No Quadro 1 são apresentadas as principais bandas espectrais do sensor TM, assim como os intervalos de comprimento de onda que as define e suas principais aplicações. Em comparação com o TM, o sensor ETM+ mantém a designação e as resoluções espacial (30 metros) e espectral (6 bandas no espectro refletivo). As exceções ficam por conta da banda termal que teve sua resolução espacial melhorada (60 metros), e da incorporação de uma banda pancromática (definida no intervalo espectral entre 0,52 e 0,90 μm), com resolução de 15 metros (SHEFFNER, 1999).

QUADRO 1 - Características das bandas espectrais do sensor TM/Landsat.

Bandas espectrais	Intervalo espectral (μ)	Principais aplicações
TM1	0,45 a 0,52	Maior penetração em corpos d'água, sendo indicada para análise dos ambientes aquáticos. Possibilita também a análise do uso da terra e das características do solo e da vegetação.
TM2	0,52 a 0,60	Abrangendo a região entre as bandas de absorção da clorofila, no azul e no vermelho, essa banda é adequada para análise da vegetação sadia.
TM3	0,63 a 0,69	Uma das mais importantes bandas para discriminação da vegetação, devido à forte absorção dessa radiação pela clorofila. Além disso, é útil para delinear limites entre tipos de solos e geológicos.
TM4	0,76 a 0,90	Essa banda é sensível à quantidade de biomassa na vegetação. É útil na identificação de culturas agrícolas e enfatiza o contraste entre solo/cultura e água/terra.
TM5	1,55 a 1,75	Essa banda é sensível ao teor de umidade ou quantidade de água nas plantas. Esse tipo de informação é adequado para estudos sobre o vigor das plantas e stress hídrico.
TM6	10,4 a 12,5	Mede a quantidade do fluxo radiante do infravermelho emitido da superfície, uma vez que a temperatura aparente é função da emissividade e temperatura real da superfície. Detecta stress térmico em plantas e presta-se a mapeamentos hidrotermais.
TM7	2,08 a 2,35	Importante em estudos geológicos por possibilitar avaliar a formação de rochas. Tem se mostrado particularmente útil na identificação de zonas de alteração hidrotermal em rochas.

Adaptado de JENSEN (2000)

Os dados orbitais do IKONOS são disponibilizados em dois modos de aquisição: pancromático e multiespectral. Os dados pancromáticos, apresentam resolução espacial de 1 metro no terreno e abrangência espectral de 0,45 a 0,90 μm . As imagens multiespectrais têm resolução espacial de 4 metros e são obtidas em 4 bandas espectrais correspondentes aos intervalos de comprimento de onda entre 0,45 a 0,52 μm (azul), 0,52 a 0,60 μm (verde), 0,63 a 0,69 μm (vermelho) e 0,76 a 0,90 μm (infravermelho próximo). Independente do modo de aquisição, a resolução radiométrica é de 11 bits (2048 níveis de cinza), proporcionando um maior poder de contraste e discriminação para as imagens produzidas (JENSEN, 2000).

No desenvolvimento desta pesquisa foram utilizadas imagens multiespectrais TM e ETM+/Landsat, referentes à órbita/ponto 223/74, tomadas em diferentes datas de passagem: 15/agosto/1985, 23/agosto/1990, 02/maio/1999, 15/maio/2000 e 15/março/2002. A cena Ikonos corresponde a uma imagem multiespectral adquirida em 16/setembro/2002.

3.3. CLASSES DE INTERESSE

A definição das classes temáticas associadas com variações espectrais no corpo d'água e relacionadas com a ocorrência de plantas aquáticas se baseou, na identificação de padrões específicos na imagem Ikonos e verificação no local. Para ilustrar essas ocorrências foram selecionados pequenos recortes da imagem Ikonos e elaboradas composições coloridas das bandas 1 (luz azul), 2 (luz verde) e 3 (luz vermelha), as quais foram submetidas a uma modificação de contraste por uma função logarítmica (para realçar as feições mais escuras da imagem). Na primeira composição colorida (Figura 2-a) estão evidentes as variações de cor da água e áreas infestadas por plantas aquáticas emersas, indicadas como D3 e D4 na figura. O padrão de infestação por macrófitas imersas é caracterizado pela coloração mais escura e textura rugosa e pode ser percebido no canal lateral (CL) e lagoa mostrados na Figura 2-b.



(a)



(b)

Figura 2 – Padrão de ocorrência de áreas infestadas em recortes de composição colorida da imagem multiespectral Ikonos, elaborada a partir da associação das bandas 1, 2 e 3 às cores azul, verde e vermelho.

Considerando tratar-se de uma análise multitemporal, a definição dos tipos de ocorrência a ser avaliados nas imagens considerou a consistência temporal na representação das classes. Assim, a partir da percepção visual das características das várias ocorrências discriminadas no conjunto de cenas multitemporais, as classes mapeadas foram especificadas conforme mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Caracterização das classes a partir do padrão que apresentam na imagem.

Classe	Caracterização na cena
ÁGUA 1	Tipo de água predominante ao longo do rio Paraná, que apresenta coloração diferenciada em relação à do rio Tietê.
ÁGUA 2	Tipo de água que ocorre no canal do rio Tietê e que assumiu coloração mais escura nas bandas do espectro do visível, após a instalação da UHE de Três Irmãos (imagens tomadas a partir de 1990).
ÁGUA 3	Tipo de água de coloração mais clara nas bandas do espectro do visível, a qual ocorre em alguns braços do rio Paraná, principalmente no Estado do Mato Grosso do Sul.
PLANTAS EMERSAS	Ocorrência de plantas aquáticas que se manifestam na superfície do espelho d'água, podendo ocorrer ao longo do corpo dos rios e reservatórios (flutuantes) ou nas suas margens (marginais). São de fácil percepção principalmente no intervalo espectral do infravermelho próximo (banda 4), no qual se apresentam em tonalidade mais clara.
PLANTAS IMERSAS	Plantas aquáticas que não emergem à superfície do corpo d'água e cuja ocorrência não é percebida nas bandas do infravermelho próximo e médio (4 e 5), mas sutilmente distinguíveis nos intervalos espectrais do visível (bandas 1, 2 e 3), pela tonalidade de cinza mais escura. A escala de percepção é: banda 2 (verde), melhor discriminação; banda 1 (azul), média e banda 3 (vermelho), percepção muito sutil.

No desenvolvimento do projeto foi utilizado o aplicativo *Spring*, o qual fornece as ferramentas necessárias para a análise dos dados de sensoriamento remoto. O *Spring* é um aplicativo de domínio público desenvolvido pelo INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, que incorpora a

funcionalidade de bancos de dados no gerenciamento dos dados, além de recursos específicos para processamento e análise de dados multiespectrais.

3.4. PROCEDIMENTO ADOTADO NA ANÁLISE DOS DADOS MULTIESPECTRAIS E MULTITEMPORAIS

Considerando o propósito de utilizar dados de sensoriamento remoto prevendo o mapeamento e monitoramento da dispersão espacial de áreas de infestação por plantas aquáticas, o procedimento metodológico adotado consistiu, inicialmente, da identificação dos padrões de ocorrência que caracterizam plantas aquáticas imersas e emersas, a partir das imagens de alta resolução Ikonos e da verificação de algumas áreas específicas que vinham sendo monitoradas "in loco".

Foi a partir dessa análise preliminar das imagens multiespectrais Ikonos que se constatou a necessidade de aplicar uma modificação de contraste, adotando uma função logarítmica, às bandas espectrais do visível e trabalhar com essas imagens contrastadas, uma vez que o contraste logarítmico destaca as feições que aparecem mais escuras na cena (corpos d'água). Esse processamento foi realizado nas três bandas do visível, para todas as imagens (TM e ETM+) e datas de aquisição, como uma forma de garantir a detecção das plantas aquáticas imersas.

A partir dessa constatação, pode-se conceber uma abordagem de análise de dados multiespectrais e multitemporais que pudesse fornecer alguns subsídios para acompanhar as mudanças na quantidade e dispersão espacial da área infestada por plantas aquáticas. Essa abordagem incluiu o georreferenciamento das imagens multitemporais; a delimitação e recorte do corpo d'água na cena, isolando-o do contexto (terra), e possibilitando a detecção de variações mais sutis na resposta espectral da água; a classificação supervisionada do corpo d'água, considerando as classes de interesse (Quadro 1) e estimativa da área infestada.

As atividades relacionadas com o pré-processamento dos dados de sensoriamento remoto no *Spring* constaram da criação de Banco de Dados e Projeto; definição de Modelo de Dados, georreferenciamento do conjunto de imagens multitemporais das datas selecionadas e importação dos dados multiespectrais e multitemporais para o Banco de Dados/Projeto criado.

O georreferenciamento, ou no caso o registro multitemporal, pressuposto para a análise simultânea de cenas adquiridas em diferentes épocas, assegura que os pixels que compõem o conjunto de imagens analisadas contemplem uma mesma região da superfície terrestre e feições espacialmente compatíveis. Como as imagens TM e ETM+ foram disponibilizadas já georreferenciadas (formato Geotiff), houve necessidade de realizar apenas um refinamento desse georreferenciamento, adotando umas das datas como referência. No presente caso, para cada época de aquisição de dados (1985, 1988, 1999, 2000 e 2002), as bandas espectrais foram referenciadas ao sistema de projeção UTM e *datum* WGS 84, através de uma transformação linear e reamostragem dos valores de brilho dos pixels pelo método do vizinho mais próximo (RICHARDS, 1986).

Realizados esses processamentos pôde-se iniciar efetivamente o processo de definição do contorno de cada reservatório, a fim de que as variações espectrais dentro do corpo d'água pudessem ser depois discriminadas. Assim, cada cena multitemporal foi submetida a um processo de classificação supervisionada por regiões, o qual inclui uma segmentação e classificação por regiões, de modo a incluir a água e as áreas marginais infestadas por plantas aquáticas emersas na área de influência do reservatório. O método de segmentação adotado foi o de *crescimento de regiões* que consiste no agrupamento de conjuntos de pixels (regiões) espacialmente adjacentes, e que é desenvolvido com base em um critério de similaridade espectral que verifica se a média entre duas regiões contíguas está consistente com um limiar pré-estabelecido. O resultado da aplicação desse algoritmo é uma imagem dividida em regiões independentes, cada qual caracterizada por um identificador que a representa. Cabe ressaltar que os parâmetros de similaridade e área adotados foram, respectivamente, 12 e 15.

A classificação da imagem segmentada foi realizada a partir da definição prévia e da aquisição de amostras para classes de treinamento referentes a água e plantas emersas. Definidas as amostras de treinamento e extraídos os parâmetros estatísticos que representam cada classe, foi aplicado um algoritmo de classificação, o qual se baseia na menor distância de Bhattacharya calculada entre cada classe e cada região definida na imagem segmentada e um limiar de aceitação pré-definido (nível de significância para cada classe, que confere maior ou menor rigidez ao classificador, quando da atribuição das regiões às classes).

Com a aplicação desse procedimento, na imagem classificada resultante ficaram representadas apenas as regiões atribuídas às classes designadas como água e plantas emersas, as quais foram integradas em uma única classe, representando o corpo d'água como um todo. O contorno definido foi, então, convertido em um polígono, e a área externa ao reservatório foi excluída em cada uma das bandas espectrais, para cada data de passagem. A partir daí, as classes de interesse puderam ser efetivamente mapeadas.

As classes de interesse, definidas no Quadro 1, foram mapeadas a partir da classificação individual das imagens multitemporais contrastadas e recortadas, usando um método de classificação

supervisionado por pixel, para que variações espectrais sutis e pontuais no corpo d'água pudessem ser detectadas. Assim sendo, a aquisição dos dados de treinamento para a classificação incluiu a extração de amostras representativas das classes de interesse, através da demarcação na imagem de conjuntos de pixels associados a cada uma das classes; a estimativa dos parâmetros das classes e a classificação de toda a cena. A abordagem de classificação adotada foi o método estatístico de máxima verossimilhança, o qual atribui cada pixel da imagem à classe mais provável, em função da similaridade dos atributos espectrais do pixel em questão com os parâmetros estatísticos (extraídos das amostras) da classe de maior probabilidade.

Realizadas as classificações do corpo d'água, para cada uma das datas de interesse, foram estimadas as áreas de infestação e essa estimativa, juntamente com a distribuição espacial de sua ocorrência, subsidiaram a verificação da eficiência do controle de plantas aquáticas usado na área.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O resultado das classificações do corpo d'água, representando as classes de interesse nas cinco datas de tomada das imagens é apresentado nas Figuras 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente para as cenas de 1985, 1988, 1999, 2000 e 2002. Nas classificações, as áreas infestadas por plantas aquáticas imersas forma representadas em vermelhos, enquanto que as infestações de emersas, em amarelo.

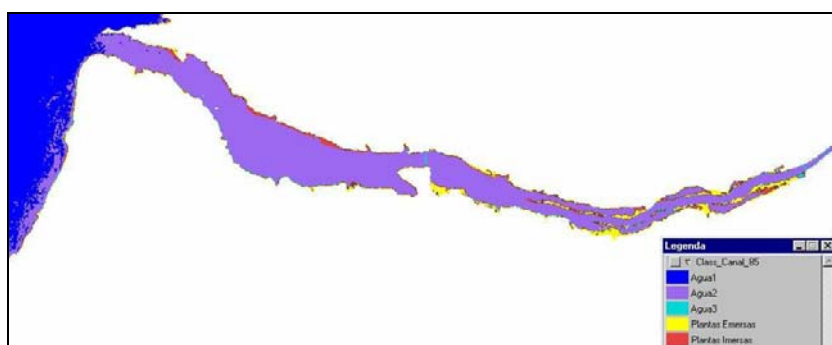


Figura 3 – Dispersão espacial de plantas aquáticas, resultante da classificação da imagem TM/Landsat de 1985.

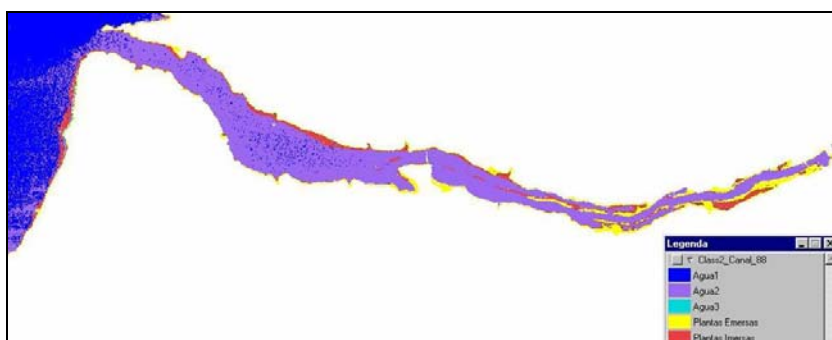


Figura 4 – Dispersão espacial de plantas aquáticas, resultante da classificação da imagem TM/Landsat de 1988.

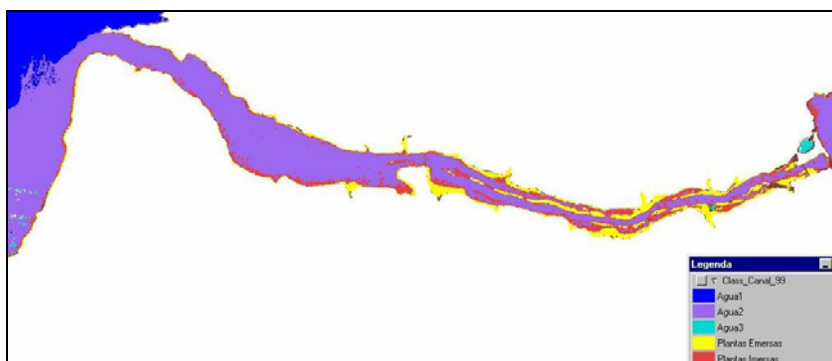


Figura 5 – Dispersão espacial de plantas aquáticas, resultante da classificação da imagem ETM+/Landsat de 1999.

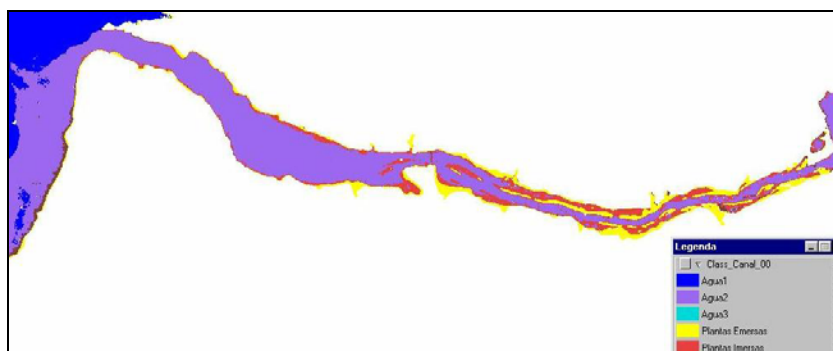


Figura 6 – Dispersão espacial de plantas aquáticas, resultante da classificação da imagem ETM+/Landsat de 2000.

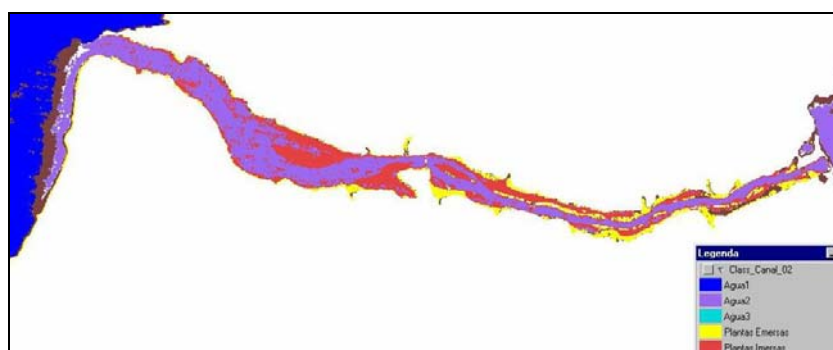


Figura 7 – Dispersão espacial de plantas aquáticas, resultante da classificação da imagem ETM+/Landsat de 2002.

A simples observação, nas classificações anteriores, da distribuição espacial de áreas infestadas por plantas aquáticas na área de estudos indica uma evolução considerável nas infestações por imersas, desconsiderando-se outros aspectos relacionados com variações cíclicas anuais ou sazonais. Pode-se notar que em 1985 e 1988 (antes da instalação da UHE de Três Irmãos) havia uma maior ocorrência de plantas emersas na área de estudos, situação que se modifica no tempo e se torna claramente definida nas classificações a partir de 1999, com a predominância de plantas imersas.

Especificamente para plantas aquáticas imersas, as classificações sugerem que de uma condição bastante similar de infestação em 1999 e 2000, houve um aumento drástico na ocorrência desse tipo de plantas em 2002. Na verdade, a situação de alta infestação em 2002 é tão destacada na Figura 7, que levou a uma nova verificação “in loco” das principais áreas infestadas e também a uma comparação do resultado da classificação com o padrão de ocorrência de plantas aquáticas imersas, interpretado visualmente e demarcado nas imagens Ikonos. Essa última verificação permitiu uma estimativa de área infestada, a partir de sua demarcação na imagem Ikonos, e mostrou que a classificação da imagem ETM+/Landsat de 2002 foi consistente na representação da dispersão espacial de plantas imersas na área de estudos, mesmo considerando sua significativamente menor resolução espacial.

Para resumir numericamente as observações anteriores apresenta-se, na Tabela 1, as estimativas de área, relacionadas com a ocorrência de plantas aquáticas emersas e imersas na área de estudos. Essas áreas, indicadas em hectare, foram estimadas a partir das classificações realizadas nas datas consideradas. Para 2002, indica-se, também, a área obtida através da demarcação na cena Ikonos dos locais de infestação por plantas imersas.

Tabela 1 – Estimativas das áreas de infestação por plantas aquáticas na área de estudos.

Ano – tipo de dados	Área de infestação (ha)	
	Plantas imersas	Plantas emersas e flutuantes
1985 – TM/Landsat	135	242
1988 – TM/ Landsat	341	455
1999 – ETM+/Landsat	720	574
2000 – ETM+/Landsat	676	576
2002 – ETM+/Landsat	1177	447
2002 – Ikonos	1072	-

Observando a Tabela 1 pode-se destacar, também, a situação das infestações de plantas emersas, apresentadas em amarelo nas Figuras 3, 4, 5, 6, e 7. Em contraste com o aumento das áreas infestadas com plantas emersas entre 1985 e 1999, a partir desta data houve uma aparente estabilização da mesma. Esse ritmo de avanço sugere que, considerando que há predominância das plantas emersas marginais ao corpo d'água sobre as flutuantes, a estagnação das áreas de infestação pode indicar uma ocupação completa das áreas aptas a suportar comunidades de plantas marginais e mesmo uma redução no processo de assoreamento nessa área.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme indicam os resultados obtidos, a investigação desenvolvida atingiu o objetivo proposto e possibilitou mapear e monitorar a ocorrência de plantas aquáticas emersas e imersas da área de estudos, a partir da utilização de dados orbitais e técnicas de sensoriamento remoto. Além disso, a abordagem adotada confirmou a possibilidade de uso das imagens multiespectrais, nos comprimentos de onda do visível, para a detecção de plantas aquáticas imersas, da mesma forma que as operações de processamento e análise das imagens multiespectrais usadas, viabilizaram a representação da distribuição espacial e estimativa da área infestada por plantas aquáticas.

Especificamente no que se refere a uma aplicação indireta das classificações realizadas, os resultados obtidos permitiram:

- analisar a evolução da infestação por plantas aquáticas imersas e marginais e flutuantes na área de estudos, através do mapeamento de sua distribuição espacial e da estimativa da área, com base nas imagens tomadas em 1985, 1988, 1999, 2000 e 2002 (Landsat e Ikonos). Essas informações forneceram subsídios para a elaboração do plano de manejo de plantas aquáticas para o reservatório de Jupuíá;
- relacionar as infestações de plantas marginais e flutuantes com as infestações de plantas imersas, do ponto de vista;
- Identificar áreas de descarte de plantas aquáticas imersas mecanicamente coletadas, considerando a ocorrência de áreas marginais e de dimensões consideráveis, ocupadas por plantas imersas.

Sobre esse último aspecto, pode-se dizer que uma outra utilidade das classificações temporais, indicando as ocorrências de plantas aquáticas, foi a possibilidade de localizar áreas de expansão de infestações de taboas que pudessem ser utilizadas para o descarte de plantas aquáticas imersas mecanicamente coletadas. Esta opção para o descarte das plantas aquáticas coletadas foi utilizada com sucesso na avaliação operacional realizada em maio de 2003.

Em suma, as classificações resultantes viabilizaram a realização de algumas inferências sobre as condições de ocorrência de plantas aquáticas emersas e imersas na área de estudos e forneceram subsídios para a elaboração de uma proposta de manejo deste tipo de vegetação aquática nessa área.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

CURRAN, P. J. **Principles of Remote Sensing**. London: Longman, 1985.

INTERSAT. **Ikonos**. <http://www.intersat.com.br/ikonos>.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: an Earth Resources Perspective**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2000. 544p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 205p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher. 1989. 308p.

NOVO, E. M. L. M.; HAMSOM, J. D.; CURRAN, P. J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 10(7):1283-9. 1989.

NOVO, E. M. L. M.; BRAGA, C. Z. F.; TUNDISI, J. G. Use of TM/Landsat data to retrieve the optically active water constituents from an eutrophic tropical reservoir. **Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium: Resource and Environmental Monitoring**, Rio de Janeiro, sept 26-30, 1994, INPE, Vol.30, Part 76, 1994, p. 258-62.

ROBIN, M. **La Télédétection**. Coll. Fac Géographie. Paris: Nathan. 1995. 318p.

RITCHIE, J. C.; SCHIEBE, F. R.; MCHENRY, J. R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 42: 1540-5. 1976.

SCARPACE, F. L.; HOLMQUST, K. W.; FISHER, L. T. Landsat analysis of lake quality. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 45(5): 623-33. 1979.

SHEFFNER, E. **Landsat 7**. <http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/17.html>.

VELINI, E. D.; GALO, M. L. B. T.; MARTINS, D.; TRINDADE, M. L. B.; CAVENAGHI, A.; SANTOS, S. C.; SEMIONATO, J. L. A. Monitoramento dos problemas com plantas aquáticas nos reservatórios dos rios Tietê, Grande, Pardo e Mogi-Guaçu. In: Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, I CITENEL, 2001, Brasília. **Anais em CD-ROM**, Brasília, ANEEL, 6 e 7 de novembro de 2001. 4p.