

Monitoramento de plantas aquáticas por satélite

Claudio Roberto Palombo¹
Marisa Dantas Bitencourt Pereira²

RESUMO O controle de infestação por macrófitas, passa necessariamente pela estimativa de sua área de ocupação. Vários métodos, entre eles os de sensoriamento remoto, podem ser aplicados, cada um com vantagens e desvantagens no que tange a custos, repetitividade e operacionalidade. As imagens obtidas por satélite oferecem, além da visão sinóptica, uma periodicidade ajustável aos objetivos e aos recursos disponíveis. Neste trabalho constatou-se que, se a infestação do corpo d'água for por *Pistia stratiotes*, é possível a obtenção de uma máscara do entorno que muito auxiliará no monitoramento do reservatório para estimar áreas de ocupação por macrófitas. Compararam-se as curvas espectrais, obtidas através das imagens, de infestações por *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes*, as quais se mostraram flagrantemente distintas.

ABSTRACT In order to control macrophytes "infestation", the first step is to find out its area of occupation. There are many remote sensing techniques available to help such estimation, each one presenting its advantages and limitation regarding to accuracy, periodicity, and availability. The satellite images can offer, besides its synoptic overview, a periodicity compatible to any objective and any budget. In this work, it was found that if the weed infestation were *Pistia stratiotes*, it will be possible to obtain a mask from the image, which will help to estimate the undesirable macrophytes area of occupation. It was also compared the spectral curves, obtained from satellite images, from both *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* which was found to be quite different.

A descarga de grandes quantidades de matéria orgânica, via esgoto, em qualquer corpo hídrico receptor, acarreta, como consequência, a eutrofização. Um dos eventos posteriores é o aproveitamento dos nutrientes liberados pela decomposição dessa matéria orgânica durante o processo da autodepuração, predominantemente pelas macrófitas aquáticas flutuantes, quando presentes.



O desequilíbrio ecológico advindo deste fato, provocará a infestação de plantas aquáticas em vastas áreas da superfície livre do corpo d'água, alterando significativamente seus múltiplos usos; dentre as espécies que se adaptam e se desenvolvem vigorosamente nestas condições destacam-se o aguapé (*Eichhornia crassipes* — Mart/Solms) e a alface-d'água (*Pistia stratiotes* L.), entre outras.

As condições acima descritas são marcadamente observadas na Represa Billings, reservatórios de Rio das Pedras e Pirapora, que fazem parte do complexo hidráulico da Eletrópaulo — Eletricidade de São Paulo.

A Represa Billings, situada próxima à capital de São Paulo, na latitude de 23° 49' Sul e longitude de 46° 30' Oeste, é um corpo d'água altamente eutrofizado, pois recebe as descargas dos esgotos efluídos através do sistema hídrico Rio Tietê/Rio Pinheiros. As descargas ocorrem através do bombeamento realizado pela Usina Elevatória de Porto Pedreira, a qual retira as águas da calha do Rio Pinheiros, introduz na represa e esta, por sua vez, abastece o Reservatório de Rio das Pedras, através da barragem reguladora de Summit Control. Este reservatório descar-

1 — Biólogo da Cetesb com Mestrado em Ecologia pelo IB-USP.

2 — Docente Depto. Ecologia Geral IB-USP com Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações pelo INPE-São José dos Campos — SP.

rega suas águas na Usina Elétrica de Henry Borden, que fornece energia elétrica para a Baixada Santista.

As macrófitas aquáticas, quando atingem altas densidades, podem provocar vários problemas, dentre os quais fornecer habitat ideal para o desenvolvimento de diversos organismos, muitos dos quais indesejáveis sob o ponto de vista de saúde pública, como é o caso de cobras, insetos e caramujos. Estes últimos constituem vetores para a malária, febre amarela, encefalite e esquistossomose. O sistema radicular dessas plantas fornece proteção e alimento a esses vetores que, emaranhados em suas raízes, são carregados a grandes distâncias, aumentando incrivelmente a velocidade de dispersão dessas doenças. Além disso, dificultam o fluxo das embarcações, proporcionam, através da alta taxa de evapotranspiração e absorção, grande perda d'água para a irrigação e geração de energia elétrica, desvalorizam os bens imóveis e diminuem a vida útil das águas pelo aumento dos detritos orgânicos e acúmulo de nutrientes.

Um dos aspectos mais importantes para um controle efetivo de macrófitas aquáticas é a possibilidade de se realizar uma estimativa precisa sobre os níveis de infestação num determinado corpo d'água, pois estes dados determinarão a montagem do cronograma de combate a essas hidrófitas, no qual estão envolvidos enormes custos financeiros.

Vários métodos podem ser empregados para se obter a área ocupada por essas plantas. Este trabalho compara o comportamento espectral das duas espécies mais abundantes, que são aguapé e alface-d'água, e decreve um método de estimativa do nível de infestação de alface-d'água.

Aguapé

O aguapé é uma macrófita aquática pertencente à família das Pontederiaceae (Classe Monocotyledoneae), cujo gênero *Eichhornia* possui 21 espécies, sendo 5 nativas do Brasil. Seu hábito é flutuante, ereto, com folhas aéreas e raízes adventícias fibrosas e submersas, não ramificadas. O rebento tende a manter-se ereto, devido à diferença entre a gravidade específica da porção submersa, que é alta, e a dos bulbos peciolares, que é baixa.

As folhas do aguapé possuem pecíolos esponjosos, ricos em tecido aerênquimatoso que possibilita a flutuação. O crescimento do rebento é monopodial, onde as folhas são produzidas num verticilo, enquanto a ramificação é simpodial, através de estolões, resultantes do alongamento de internós, que originam vegetativamente nas plantas, chegando a formar grupos de 10 a 15 indivíduos.

A característica do aguapé possuir pecíolos intumescidos que permitem a flutuação, associada à morfologia das folhas que funcionam como "velas", possibilitando às plantas serem impulsionadas pelo vento, até mesmo em sentido contrário à correnteza, constituem a principal razão para a alta taxa de proliferação apresentada por esta espécie.

Atualmente, a distribuição do aguapé depende da influência humana, que tem sido apontada como principal agente de dispersão desta espécie por todo o mundo. Na América do Sul, é amplamente distribuído na Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai, Bolívia, Equador, Colômbia, Chile, Guiana, Suriname e Venezuela. Hoje o aguapé é distribuído nos trópicos e subtropicais entre os paralelos 38° N e 38° S, ocorrendo em lagos de água doce, lagoas, tanques, diques, reservatórios, rios, canais de irrigação, charcos, e outros.

Devido aos enormes problemas causados pela presença do aguapé, necessita-se periodicamente controlá-lo a níveis que não interfiram com os múltiplos usos da água. Os

métodos utilizados são: a) químico, através do uso de produtos herbicidas, onde o mais comum é o 2,4-D (2,4 diclorofenoxiacético); b) mecânico, através de equipamentos que colhem ou esmagam a planta; e c) biológico, através da introdução de um predador (inseto) e/ou de um parasita (fungo patógeno).

Alface-d'água

A espécie *Pistia stratiotes*/L. (alface-d'água ou erva-de-Santa-Luzia), pertencente à família Araceae (Classe Monocotyledoneae), assemelha-se a um pé-de-alface aberto, de onde advém um de seus nomes vulgares; é uma planta estolonífera, hidrófila, livre-flutuante, perene, que ocorre em água doce, nos trópicos do Velho e Novo Mundo.

Pistia stratiotes é uma planta esponjosa, constituída por uma roseta em forma de concha, com folhas verde-amareladas claras; da porção central sai um tufo de raízes imersas fibrosas, não ramificadas chegando até 40 cm de comprimento; as folhas que são levemente pubescentes em ambas as faces, estão arranjadas em espiral ao redor de um eixo central, podendo medir de 10 a 20cm, além de possuir diversas nervuras distintas, irradiando-se da base para o ápice, sendo mais visível na face abaxial; as plantas são interligadas através de estolões.

A alface-d'água parece desenvolver-se melhor em águas paradas ou áreas de fluxo mínimo, crescendo principalmente como livre-natante, porém, pode sobreviver semi-enraizada por longos períodos.

Os problemas causados pela presença da alface-d'água são inúmeros, dentre os quais pode-se citar: uma ameaça para as culturas de arroz, reduzem a navegabilidade, dificultam a atividade da pesca, criam condições de habitat adequado para a proliferação de mosquitos, impedem a penetração da radiação solar, não permitem a reaeração da água, além de prejudicar a fotossíntese na zona eufótica da camada líquida e servem de abrigo para microrganismos patógenos.

O combate desta hidrófita também pode ser empreendido sob a forma de controle químico, através da utilização de produtos herbicidas; outro método que pode ser empregado é o biológico, através da dispersão de predadores (insetos) e/ou parasitas (fungos patógenos).

A alface-d'água é utilizada como planta medicinal desde o ano 27 a.C., no Egito, além da Nigéria e China. Por muitos séculos na Ásia, também foi empregada no tratamento de inflamações na pele, e atualmente é empregada contra inflamações urinárias no Pantanal do Mato Grosso.

Utilização de imagens de satélite na detecção e no monitoramento destas macrófitas aquáticas em reservatórios

Fundamentos teóricos

Sensoriamento remoto é a maneira de estudar um determinado alvo da superfície da Terra sem contato físico com o mesmo, baseando-se somente na interação do alvo com a radiação eletromagnética (REM). Conforme o alvo e a faixa do espectro, a interação pode diferir profundamente (Gates, 1965; Pereira, 1986; e Sausen e Pereira, 1986).

O sistema Thematic Mapper (TM) a bordo do satélite LANDSAT-5, apresenta sete faixas espectrais, sendo três do visível, infravermelho próximo, médio e termal.

As faixas mais comumente utilizadas para sensoriamento remoto de vegetação sobre água estão dentro do visível ou VIS (400 a 700 nm) e o infravermelho próximo ou IVP (700 a 1100 nm).

Neste trabalho serão utilizadas imagens do TM-2 ou verde (520 a 600 nm), TM-3 ou vermelho (630 a 690 nm) e TM-4 ou infravermelho próximo (760 a 900 nm), em duas datas (19.06.1986 e 14.08.1989).

Comportamento espectral da vegetação

Ao entrar em contacto com a vegetação fotossinteticamente ativa a REM tem o seguinte comportamento:

a) absorve fortemente no azul (B), no vermelho (R) e no infravermelho médio (IVM), graças à presença de pigmentos (B e R) e de água (IVM). Em outras palavras, quanto mais clorofila e/ou água, mais baixa a reflectância nestas faixas.

b) reflete fortemente no infravermelho próximo (IVP), graças à estrutura do mesófilo das folhas verdes e vivas. Em outras palavras, quanto maior o número de folhas mais alta a reflectância nesta faixa.

Este comportamento espectral antagônico levou muitos pesquisadores a propor modelos matemáticos capazes de indicar a densidade da fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por área. É importante salientar que a imagem obtida por satélite é resultado da energia refletida pelos alvos da superfície, em cada faixa, e que no caso da vegetação a resposta espectral se deve única e exclusivamente à interação da REM com as folhas vivas. Sabe-se, também, que há uma diferença sensível entre as respostas espectrais de uma folha jovem e uma folha madura, resultantes das diferentes concentrações de pigmentos e de conteúdo de água.

Comportamento espectral da água

Ao entrar em contato com a água, a REM é sempre muito absorvida desde o visível (VIS) até o IVP e IVM. Contudo, observa-se um aumento da energia refletida quando há materiais em suspensão ou flutuantes.

Estes materiais podem ser fitoplâncton, partículas minerais ou vegetação flutuante (macrófitas aquáticas).

Apresentação e adequação dos dados espectrais

As imagens de satélite constituem-se de matrizes em cujas celas encontram-se números digitais ou ND que variam de 0 a 255. Estes números digitais crescem com a reflectância proveniente dos diversos alvos que compõem a superfície da Terra.

Importante lembrar que reflectância zero corresponde a ND = zero e que o máximo de reflectância apresenta ND = 255.

Quando se trabalha com imagens de datas distintas, é imprescindível que se faça uma correção para compensar o efeito do ângulo de elevação solar que está embutida no ND.

Para se atenuar este efeito, é necessário que se obtenha um fator (F), para cada data diferente, que pode ser definido da seguinte maneira (Richardson et alii, 1982):

$$F = \frac{\text{seno do ângulo de elevação solar médio}}{\text{seno do ângulo de elevação solar da imagem}}$$

Além dos tratamentos de imagens que visam corrigir efeitos indesejáveis, tais como o anteriormente descrito, existem manipulações de imagens individuais, que permitem análises quantitativas.

Dentre estas, existe o fatiamento dos NDs em classes a partir de imagens individuais. Este recurso permite que se faça uma discriminação precisa de cada nível de ener-

gia. Pode-se fatiar os NDs um a um ou em intervalos que caracterize um fenômeno de campo previamente compreendido.

Outra vantagem deste tratamento é a possibilidade de se examinar a ocorrência de cada ND registrado na imagem, sua proporção em relação aos demais, assim como a área que estes níveis de energia ocupam.

Outras manipulações de imagens que podem ser úteis são as combinações matemáticas de duas ou mais imagens, lineares ou não, que geram novas imagens não mais de ND, mas sim de índices ou números puros. Estes índices devem indicar um parâmetro de campo capaz de ser caracterizado espectralmente.

O índice mais testado até o momento é o de vegetação que relaciona dados espectrais devidos à presença de clorofila e à estrutura do mesófilo das folhas fotossinteticamente ativas.

Por ser o índice mais simples, por ter apresentado o melhor desempenho e por ter sido bem aceito pela comunidade científica, o índice de vegetação que faz parte do SITIM do DEG-IB-USP é o de diferença normalizada ou IV. Este índice foi desenvolvido por Rouse et alii (1973) e sofreu algumas modificações para poder ser incluído no software do SITIM.

O índice originalmente relacionava os NDs do TM-3 (R) e TM-4 (IVP) da seguinte maneira:

$$IV = \frac{TM-4 - TM-3}{TM-4 + TM-3}$$

Entretanto, as imagens são compostas por números inteiros e, calculado pela equação acima, cada IV seria sempre menor que a unidade. Considerando que os NDs se relacionam com a radiância (L) da seguinte maneira:

$$ND = \text{Ganho } L + \text{Offset}$$

multiplicou-se um número a cada IV, de modo que não mascarasse o contraste obtido com este tratamento de imagens.

Deste modo, o IV do SITIM passou a ser:

$$IV = [(TM-4 - TM-3) / (TM-4 + TM-3) 256] + 0$$

Com o ganho igual a 256 a imagem índice fica na mesma escala das que lhe deram origem, sem o perigo de saturação, uma vez que a resposta espectral da vegetação no IVP já fica saturado quando o estrato passa de arbustivo para arbóreo (Colwell, 1974 e Knipling, 1970).

O uso de imagens índice de vegetação tem se mostrado bastante útil uma vez que coloca em destaque as informações espectrais relativas exclusivamente à vegetação fotossinteticamente ativa.

Proposta metodológica para cálculo de área ocupada por macrófitas aquáticas

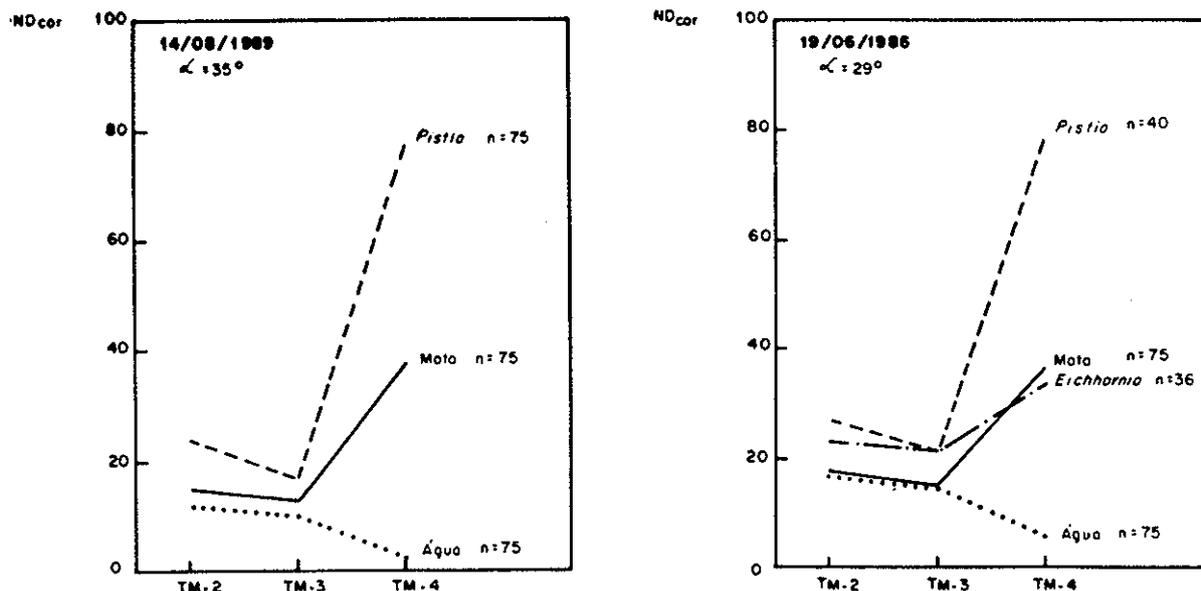
Esta proposta metodológica consiste basicamente de três etapas.

1 — Distinguir as respostas espectrais das macrófitas

Com uma composição colorida onde TM-4 recebe a cor vermelha, o TM-3 a cor verde e o TM-2 a cor azul, pode-se fazer uma análise qualitativa dos diferentes alvos compreendidos na área do reservatório em estudo.

Nesta composição, que imita uma fotografia infravermelho falsa-cor, quanto mais vermelha mais densa é a vegetação, seja ela terrestre ou flutuante.

Figura 1. Curvas espectrais de água, mata e macrófitas (*Pistia* e *Eichhornia*) de duas datas, obtidas de imagens do satélite LANDSAT-5 devidamente corrigidas em relação ao efeito do ângulo de elevação solar.



Sobre esta imagem extrai-se os NDs das três faixas (IVP, R e G, respectivamente, TM-4, TM-3 e TM-2), nos alvos de interesse, ou seja, água, mata e vegetação flutuante. Plotam-se gráficos e confere-se qual das vegetações flutuantes difere nitidamente da vegetação ribeirinha. Caso haja uma macrófita aquática bem distinta espectralmente, passa-se para a etapa seguinte.

2 — Isolar as respostas espectrais do reservatório

A partir do método de classificação por fatiamento, somam-se as respostas espectrais da água e dos alvos flutuantes na faixa do TM-4, onde a água absorve fortemente e a vegetação verde reflete moderadamente. O resultado é uma "máscara", que corresponde à área real do reservatório, que uma vez sobreposta às imagens de outras faixas, geram um produto contendo somente água + alvos flutuantes.

3 — Mapear e quantificar a área recoberta pelas macrófitas

Para melhorar o contraste, o tratamento de imagens mais prático e eficiente é a geração de uma imagem índice de vegetação utilizando as imagens do TM-3 e TM-4 correspondentes somente ao corpo d'água, ou seja, aquelas

Tabela 1 Números digitais (ND) depois de serem corrigidos em relação ao efeito do ângulo de elevação solar das duas datas, dos alvos água, mata e aguapé e alface d'água.

	Água	Mata	Aguapé	Alface d' água
19-06-1986 — ângulo de elevação solar de 29°				
TM-2	17	17	22	27
TM-3	14	14	21	21
TM-4	6	36	34	79
14-08-1989 — ângulo de elevação solar de 35°				
TM-2	12	15	—	24
TM-3	10	13	—	17
TM-4	3	38	—	78

que apresentam somente os NDs correspondentes a águas e os correspondentes aos alvos flutuantes.

Ao classificar por fatiamento a imagem índice de vegetação obtida distingue-se facilmente aquilo que é água daquilo que é vegetação fotossinteticamente ativa. Além disso, o algoritmo também fornece a área ocupada por cada classe.

Finalmente, fotografa-se o vídeo com a imagem classificada e obtém-se um decalque das duas classes estudadas.

Resultados

Análise da vegetação marginal e flutuante.

O comportamento espectral da água, da mata e das duas espécies de macrófitas aquáticas mais frequentes no complexo Billings, são apresentados na Figura 1 a, b e na Tabela 1.

Nesta figura são apresentadas as curvas espectrais médias, dos alvos mata, água e duas variedades de macrófitas emergentes, em duas datas distintas. A tabela traz as etapas de tratamento dos dados espectrais extraídos das imagens em cada faixa estudada.

Apesar de estes dados serem de datas diferentes, o fato de terem sido corrigidos contra o efeito do ângulo de elevação solar nos permite comparar seus valores. Estes dados foram obtidos através da média de diferentes variedades de um mesmo alvo. No caso da água, tomaram-se amostras de diferentes locais ao longo do reservatório, de modo a se obter uma média representativa. No caso da vegetação tomaram-se amostras de diferentes coberturas vegetais do tipo densa, presentes nas margens do reservatório. No caso da vegetação flutuante, baseou-se nas informações fornecidas pelos técnicos da CETESB a respeito dos locais e dos tipos de macrófitas predominantes. A amostragem dos "pixels" foi feita isolando-se aqueles "pixels" referentes à água e evitando-se sempre os pixels de borda das ilhas de vegetação flutuante amostradas.

Como era de se esperar, observa-se uma enorme semelhança entre os mesmos alvos nas duas datas. A pequena variação que há pode ser explicada facilmente pela heterogeneidade atmosférica de um ponto para outro e a possibilidade de existir efeitos aditivos com pesos diferentes entre uma data e outra, que não foram corrigidos por falta de verdade terrestre simultânea. De qualquer modo, há

uma nítida diferenciação entre água, mata e alface d'água, embora entre aguapé e mata quase não haja diferença.

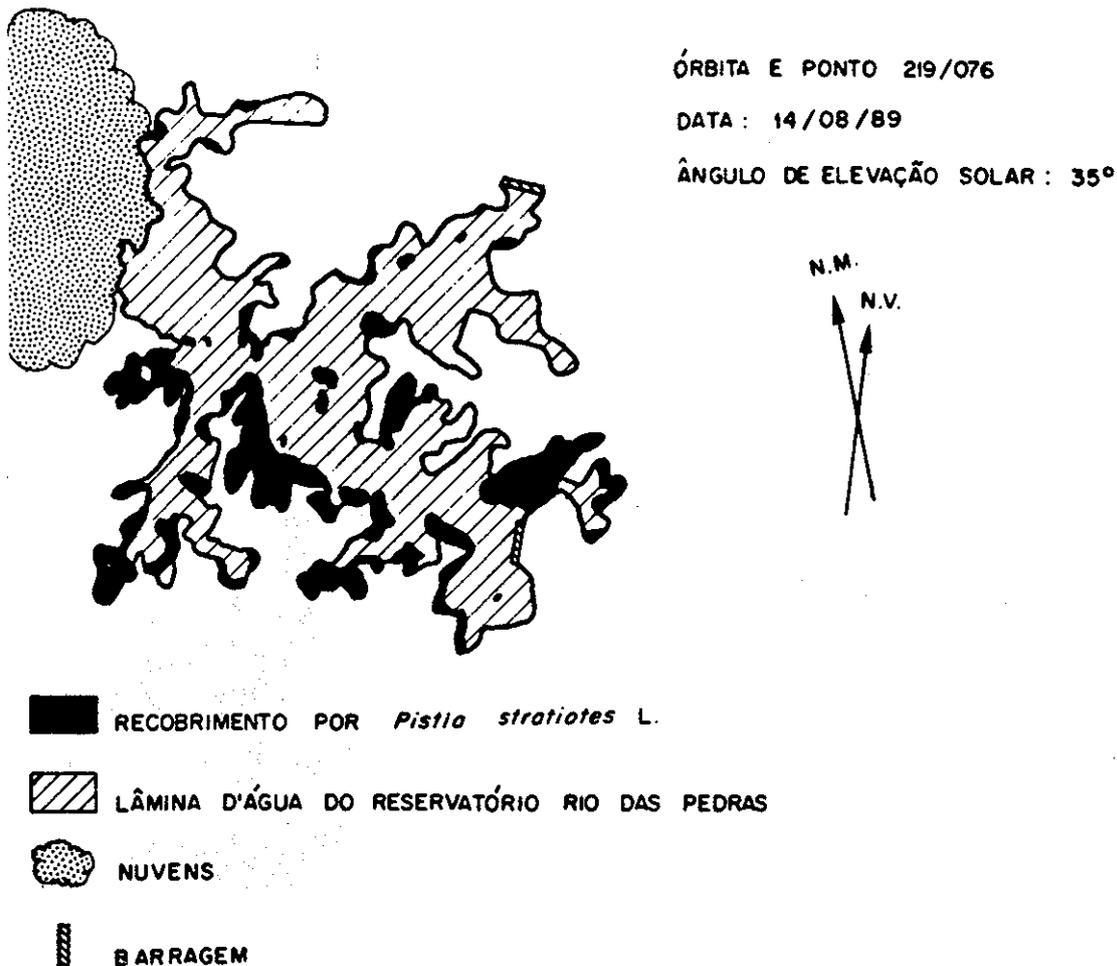
Estimativa da área ocupada pela vegetação flutuante

Uma vez confirmado o predomínio de *Pistia stratiotes* no Reservatório de Rio das Pedras na primeira semana de agosto de 1989, procedeu-se ao tratamento de imagens multiespectrais do LANDSAT-5, de 14.08.1989, para verificar a separabilidade dos principais alvos para, a partir daí, desenvolver um aplicativo.

Ao se somar os "pixels" com níveis de energia referentes à água e os referentes à hidrófita infestante, obtém-se uma classe única ou "máscara" que tem forma e área equivalentes ao reservatório. Com esta máscara, calcula-se a área da lâmina d'água, neste caso foi de 5,98 km², apesar de ter havido perda de parte da informação por conta de uma nuvem presente sobre o reservatório.

A Figura 2 apresenta um esquema da área da água + a área infestada, bem como a posição da nuvem. Segundo a ELETROPAULO, nesta data a cota média apresentava um entorno com área de 6,39 Km².

Figura 2 — Representação gráfica do Rio das Pedras em 14.08.1989, obtida a partir de imagem de satélite, onde estão indicadas as áreas ocupadas pela *Pistia stratiotes*.



A seguir, classifica-se, por fatiamento, a imagem índice e se obtém a área ocupada pela macrófita infestante que, neste caso foi de 1,05 km². Comparou-se o fatiamento do TM-4 com a imagem IV e notou-se uma melhoria sensível no produto final com o uso da imagem índice uma vez que com este algoritmo, as diferenças entre a resposta espectral no vermelho e no infravermelho próximo são nitidamente destacadas.

A comparação deste método espectral com o método planimétrico (através do uso de fotografias de helicóptero), tradicionalmente utilizado pela ELETROPAULO, mostra uma ótima correspondência entre os resultados obtidos por satélite. A diferença está na economia de tempo e dinheiro uma vez que os dados de satélite encontram-se disponíveis para quem desejar. Com imagens de satélite, é possível obter, rapidamente, com uma simples classificação por fatiamento do IV, dados precisos sobre a área ocupada por esta macrófita, além de poder reproduzi-los cartograficamente.

Conclusão

A precisão e a rapidez na obtenção dos resultados e a possibilidade de monitoramentos periódicos com custos relativamente baixos (se comparados os custos de idas ao campo e de levantamentos aéreos), justificam a utilização do sensoriamento remoto no acompanhamento, controle e combate de infestações de corpos d'água por macrófitas aquáticas, especialmente quando se trata de grandes reservatórios.

A caracterização da resposta espectral de *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* vem sendo objeto de estudo do Laboratório de Sensoriamento Remoto do Depto. de Ecologia Geral da USP, já que estas espécies são as mais frequentes em reservatórios artificiais. Os resultados aqui apresentados referem-se somente à resposta espectral registrada pelo satélite, resta ainda a obtenção das curvas espectrais de campo e de laboratório.

BIBLIOGRAFIA

- COLWELL, J.E. (1974) Vegetation Canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 3 (3): 165-183.
- GATES, D.M., KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C., WEIDNER, V.R. (1965) Spectral properties of plants. *Applied Optics* 4(1): 11-20 Jan.
- KNIPLING, E.B. (1970) Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environm.* 1(): 155-159.
- PALOMBO, C.R. (1989) "Avaliação de propagação vegetativa de *Eichhornia crassipes* (aguapé) e *Pistia stratiotes* (alface d'água) em condições da Represa Billings — São Paulo". Dissertação de Mestrado, Depto. Ecologia Geral — IBUSP, defendida em 08.12.1989, com 202 p.
- PALOMBO, C.R.; BERTOLI, J.L.R. (1987) Atuação da CETESB frente aos contratos com a ELETROPAULO. CETESB-Relatório Histórico-Informativo, 31p.
- PEREIRA, M.D.B. (1986) "Correlação de fitomassa foliar de Campo Cerrado com dados espectrais obtidos pelo sistema MSS-LANDSAT e por radiometria de campo." Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações. São José dos Campos — INPE 90p. (INPE-3747-TDI-203).
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERINGS, D.W. (1973) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *ERTS Symp.*, 3, 1973. *Proceedings*. NASA SP-351 V 1:309-317.
- SAUSEN, T.M.; PEREIRA, M.D.B. (1986) Estudo da qualidade d'água de reservatórios utilizando técnicas de sensoriamento remoto: Conceitos metodológicos. In: *Simp. Latino-Americano de Sens. Remoto*. Gramado, RS de 10-15 Ago. 1986. *Anais. INPE/SELPER/SBC Vol. 1:638-644, São José dos Campos, SP.*

